

普通高等教育“十五”国家级规划教材

An Introduction to Archaeometry

科技考古学概论

主编　赵丛苍

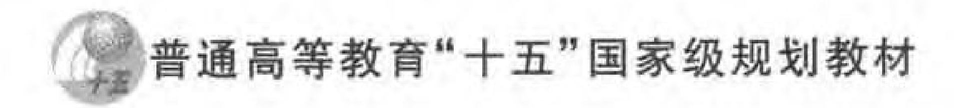
高等教育出版社

科技考古学概论 An Introduction to Archaeometry

ISBN 7-04-017909-1

9 787040 179095 >

定价 35.90 元



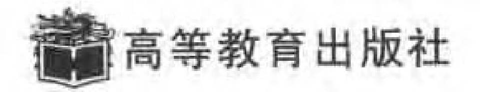
An Introduction to Archaeometry

科技考古学概论

主　编　赵丛苍

编　者　赵丛苍　郭妍利　刘　成

朱君孝　凌　雪



内容提要

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材，分为绪论、上篇和下篇共三部分。绪论部分主要论证科技考古学的概念、理论与方法以及该学科的发展简史等；上篇重在介绍科技考古学获取资料的基本方法；下篇主要叙述科技考古学研究过程中的基本内容。本书适于高校考古、博物馆学专业和文物保护学专业教学使用，也适于相关专业人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

科技考古学概论/赵丛苍主编．—北京：高等教育出版社，2006.5
ISBN 7-04-017909-1

Ⅰ.科… Ⅱ.赵… Ⅲ.科学技术-考古学-高等学校-教材 Ⅳ.K854

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第037658号

出版发行	高等教育出版社	**购书热线**	010-58581118
社　　址	北京市西城区德外大街4号	**免费咨询**	800-810-0598
邮政编码	100011	**网　　址**	http://www.hep.edu.cn
总　　机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
经　　销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landraco.com.cn
印　　刷	北京四季青印刷厂	**畅想教育**	http://www.widedu.com
开　　本	787×960　1/16	**版　　次**	2006年5月第1版
印　　张	29	**印　　次**	2006年5月第1次印刷
字　　数	480 000	**定　　价**	35.90元

物料号　17909-00

郑重声明

策划编辑　于健航　于晓宁

责任编辑　鲍莉炜

封面设计　刘晓翔

责任绘图　杜晓丹

版式设计　范晓红

责任校对　胡晓琪

责任印制　尤　静

序

考古学与自然科学的交叉和融合，使自身体系不断得以充实、发展和完善，并孳生出众多分支学科。在这些分支学科中，科技考古学有着特殊重要的地位。不难看到，科技考古学的发展，日益深化着考古学的研究层次，不断拓宽着考古学的研究范畴，从根本上改变了考古学的面貌。^{14}C 测年方法的建立，使定性描述的考古学嬗变为定量表述的科学；孢粉、植硅体和稳定同位素等方法的介入，使考古发掘的注意力从文化层延至周边环境和耕作层，奠定了农业起源研究的基础；而文物产地与古代 DNA 分析，旨在探索不同文化间的交流和先民的迁徙路线，使复原古代动态历史的梦想成真。

如今，科技考古学的重要性及其诱人的前景，似乎已毋庸置疑。然而，关于科技考古学与考古学的关系，至今仍有不同的认识。有学者认为，根本就不存在什么科技考古学，只有科学技术在考古学中的应用。也有学者认为，科技考古学是考古学的分支学科，但对分支学科领域的限定，又有两种不同的观点。一种观点认为，科技考古学涵盖了整个考古学的领域，另一种则认为，科技考古学和陶瓷考古学、冶金考古学、农业考古学等一样，仅限于考古学的某一局部领域，即以物理、化学分析方法研究的考古学领域，通常指陶瓷考古和冶金考古等领域。还有

学者认为，科技考古学就是考古学，它代表着考古学的未来。一时间各持己见，莫衷一是。

导致上述不同认识的原因很多，有主观的，也有客观的。主观原因颇为复杂，不宜在此讨论。至于客观原因，则主要有两点，一是科技考古学始终处于发展之中，其所涉及领域的发展又不甚平衡。这一点，从我国考古发掘报告编写内容的变化可见一斑。最初，除^{14}C的测年数据和相关分析外，几乎见不到科技考古研究的痕迹，后来，环境考古研究逐渐受到考古学家的青睐，成为考古发掘报告中不可或缺的组成部分。近来，动物考古学、植物考古学、生物考古学等研究成果都已在一些考古发掘报告中占了一席之地，但在科技考古学和考古学全方位、深层次协作研究基础上，复原古代社会及其所处环境的考古发掘报告，似乎尚未出现。二是迄今为止，还没有出版过科技考古学的专著。以前出版的相近专著，或内容仅涉及科技考古学的某一领域，或为科技考古的方法。这样，人们对科技考古学的认识，难免只见树木，不见森林。

早在1999年为中国科学技术大学的研究生开讲"科技考古学概论"时，我便萌生了编写相关教材的愿望，然而，一旦动笔，即感力不从心，几经反复，不仅未能如愿，还使我几乎失去了信心。大约两年前，正当我深感欲达无望、欲罢不能之时，西北大学赵丛苍教授竟然完成了《科技考古学概论》的初稿，并请我帮助审稿。尽管半信半疑，还是答应帮他审稿。然而，一睹他的初稿，即感耳目一新，直觉告诉我，赵丛苍教授终于构成了一个近乎完整的科技考古学体系。我兴奋地将有关意见告诉赵教授，并由衷感谢他邀我为书稿作序。

日常的繁杂事务，使我身不由己，直至今年7月初，方着手仔细拜读赵教授的《科技考古学概论》书稿。阅后不难发现，整个书稿以科技考古学的概念、理论与方法以及学科的发展简史等为绪论，以考古勘查、考古发掘、样品采集、遗存保护等为上篇，以时空框架、文物结构成分、生业、体质人类学和古代DNA等考古研究为下篇，以考古勘查、发掘和研究为主线，构成了近乎完整的科技考古学体系，其内容几乎覆盖了科技考古学的所有领域，涉及众多现代技术和数理化天地生等学科知识。作为一个考古学家，自然科学应为其弱项，然而，为了我国考古学的学科建设，赵丛苍教授居然孜孜以求十余载，克服了难以想象的困难，终于编写出这样一本颇为完善的《科技考古学概论》教材，这是需要何等的勇气和魄力呀！我不禁为赵丛苍教授的精神所折服，他使我真正认识到"有志者，事竟成"之真谛。

无疑，新生事物总有不足之处，这本《科技考古学概论》也不例外。然而，我相信，这本教材对我国考古学和科技考古学的贡献，教育界和学术界是不会低估的。

王昌燧
2005年7月18日

目 录

绪论

下篇

遗迹、遗物的分析研究

绪论

考古遗存是人类历史的信息载体，它记载着大量人类活动的内容和过程。考古学家通过各种手段从中提取历史信息，加以科学的分析与处理，旨在揭示人类社会的发展史，探索其演变的规律。

众所周知，考古学是自然科学技术与人文社会科学交叉融合的产物。考古学之所以成为科学，从根本上讲，得益于地质地层学和生物分类学的移植。而考古学的发展历程，说到底，就是一个不断吸纳自然科学方法、理论的过程。考古学的每一次革命性变革，几乎都是自然科学新方法成功应用的结果。其中，最为重要的是20世纪放射性同位素断代法的革命，它使考古年代学脱离了含糊其辞的臆断①。之后，随着科学和社会的发展，自然科学日益广泛地走进考古学，产生出许多交叉学科和分支学科，这中间，科技考古学最显重要。

① ［英］格林·丹尼尔著，黄其煦译：《考古学一百五十年》，文物出版社1987年版，第351—366页。



第一章
科技考古学的出现

第一节　考古学的发展

在世界范围内，考古学的诞生有近两百年的历史。回顾考古学的发展，它经历了前考古学、近代考古学和现代考古学三个阶段。前考古学即古器物学，近代考古学是以考古地层学和考古类型学为两大支柱，现代考古学则是以研究人类行为、追寻文化的历史进程和发展规律为目的的。

在考古学的发展历程中，世界各地走过了大体相似的路线。20 世纪中叶（在中国则是 80 年代前后），许多国家的考古学家以考古学理论为指导，在世界各地积极地开展田野发掘，以各种器物组合和器型的研究为依据，探索考古学文化演变的时空框架，初步建立了考古学的体系，基本确立了各个地区不同时代考古学文化的区、系、类型框架。20 世纪 60 年代出现的新考古学派，对传统考古学提出了质疑，他们大量引进新概念（如假说—演绎—验证模式），推崇多学科交叉和跨学科的综合研究，努力将诸如电子定位、浮选、筛选、理化分析、高精度测年、数学计量等新技术和新手段应用于考古研究之中，使蕴涵于考古遗存中的各类“潜”信息得以充分揭示，从而拓宽了研究领域，深化了研究层次，并将考古学重建已逝历史的研究目标，进一步提升至探索人类行为和古代历史规律性的更高层次。

考古学要求在世界时空范围内进行物质、精神和社会的研究，旨在揭示人类行为的成因、模式及其与环境的关系等。考古学发展到今天，实物资料的积累愈来愈

多,欲充分揭示它们所包含的蕴藏深广的时空内容和丰富信息,绝非传统考古学方法所能胜任,必须借助其他学科的理论和方法,才有望接近这一目的。由此不难理解,广泛利用现代科学技术,进行多学科综合性研究,已势在必行,且唯此考古学才有生命力。考古学发展的客观需求,使众多的考古学分支学科应运而生并付诸实践,如环境考古学、聚落考古学、城市考古学、实验考古学、物理考古学等,当然也包括科技考古学。在一定意义上可以说,"中国考古学未来的发展,与分支学科的增加和完善将是息息相关的"①。

科技考古学等相关考古学分支学科的出现,具有划时代的意义,"从此进入了现代考古学的时期,在此以前则可以划入近代考古学的范围"②。而相比之下,科技考古学更具典型意义。似乎可以认为,如果说近代考古学是以田野调查和发掘为标志的话,那么,科技考古学的出现则可看作是现代考古学的一个重要标志③。

第二节 科学技术的发展

科学的发展趋势表现为现代科学的整体化。20 世纪后的科学既是高度分化的,又是高度综合化、整体化、社会化的,二者互相依存,更深刻、全面地反映了自然与社会。

科学整合化体现在:

(1) 自然科学与社会科学的日趋结合。列宁早就指出:"自然科学奔向社会科学的强大潮流……在 20 世纪,这个潮流是同样强大,甚至可以说更加强大了。"④自然科学为社会科学提供方法、手段,社会科学又为自然科学的发展方向、目标、布局等提供战略指导。

(2) 交叉学科、边缘学科、综合学科的大量涌现。这些学科从方法到内容上都要求自然科学与人文科学的交融。我国著名科学家钱三强断言:"本世纪(20 世

---

① 知原:《面向大地的求索——20 世纪的中国考古学》,文物出版社 1999 年版,第 280 页。

② 严文明:《科学技术与考古学》,《科技考古论丛》第 3 辑,中国科学技术大学出版社 2003 年版。

③ 严文明先生在《农业考古与现代考古学》(《走向 21 世纪的考古学》,三秦出版社 1997 年版,第 130 页)中指出,近代考古学是以田野工作为基础并以研究考古学文化为主要内容的,现代考古学的标志有二:历史唯物主义的指导和现代科学技术的广泛应用。

④ 《列宁全集》第 20 卷,人民出版社 1961 年版,第 189 页。

纪)末到下一个世纪初将是一个交叉科学时代。"①这些新兴学科不但在不同程度上使历史上完全分离的基础学科融合起来,也填平了不断生长的新分支学科的界沟,把离散的学科交织为一个有机的整体。

考古学作为一门科学,自然不能背离现代科学发展的总轨道,因此也呈现出与人文科学、自然科学相结合的趋势。面对不会说话的、庞杂无章的遗迹遗物,仅限于传统的方法和理论,已不适应大科学时代的要求,对每一件携带不同量度的考古学信息,解析它须得借助现代科学的思维、方法和技术。

"由于现代科学技术在考古学方面的广泛应用,出现了许多过去从来没有或者仅有萌芽的研究领域或分支学科。例如从遗址的发现与勘探就产生了航空考古、遥感考古、水下考古、地质考古等;从研究的内容和方法来看则有所谓实验考古、环境考古、农业考古、科技考古、陶瓷考古、冶金考古、植物考古、动物考古等等。其结果不仅是大大拓展了考古学研究的领域,而且大幅度地提升了考古学研究的准确度和研究层次……提高了考古学科学化的程度,从而使考古学发生了根本性的变革。"②

科技考古学正是利用现代科学技术手段获取考古资料和进行考古研究,是人文科学与自然科学融会而形成的一门考古学分支学科。

第三节　社会发展的需要

现代人类享受着当代文明所带来的益处,同时也面临着许多棘手问题,人口膨胀,耕地减少,植被遭到严重破坏,非再生资源枯竭,废气、废水、废渣充溢,一言以蔽之,生态平衡严重失调。物质丰富并不是一味地给人类带来幸福,财富占有的不公正、人类价值观的下降、人类是否沦为技术和物质财富的奴隶等问题不是简单地依靠科学技术就能够解决的。要探讨人类生存的总体状况、人类未来的命运,必须要从人类生存的根本角度去考虑,人类必须为自己有一个良好的生存环境而努力。而预测未来的基础是对过去有一个全方位的、多维的、深刻的了解。特别是一些领域的科学家需要弄清楚本学科的发展脉络及演变规律,其中不少重要信息来源于

① 钱三强:《迎接交叉科学的新时代》,《光明日报》1985 年 9 月 17 日。
② 严文明:《科学技术与考古学》,《科技考古论丛》第 3 辑,中国科学技术大学出版社 2003 年版。

考古资料，而这需要对其有准确、全面的释读。如此便促进了环境考古学、文化生态学的发展以及聚落形成等情况的研究，科技考古学的成果已经给公众和科学家带来很大的收益①。

随着社会的进步和经济建设的迅速发展，大规模的基础建设，如修路、建厂、盖楼房等活动，极有可能使大量的遗迹、遗物暴露出来。众所周知，掩埋于地下的古代遗存属不可再生资源，其数目只能是不断减少。从一定意义上讲，考古发掘对遗存是一种破坏，一旦发掘，遗存再也无法完全回复到原态。因而，如何在有限的时间内，有效地发掘和揭示古代遗址及其信息，是考古学面临的现实问题。社会已给考古学出了许多难题，考古学要圆满回答和解决这些问题，就必须提高自已的研究手段，开阔自己的研究领域，而科技考古学正是担当此任的希望所在。如在发掘之前可以对遗址进行周密的勘探，将遥感、声呐、物理探测法与传统勘探法相结合，使考古调查更加快捷、准确；在发掘过程中，尽量广泛收集考古资料，使遗漏的信息降至最低；而分析遗物时，则尽可能采用“无损伤”方法等。

此外，古代遗存因经过长期埋藏，已经适应了地下特定的环境，基本上处于稳定和平衡状态，通常易于长久保存。然而，一经发掘，遗存所处环境便失去原有平衡，空气、光、热等因素将在瞬间引起剧烈的化学反应，使遗存受到严重的损坏。目前，这种抢救性的文物保护问题显得特别严峻。与此同时，地面遗存的风化现象也令人担忧。为此，各国政府都制定了古物保护法、文物保护法等各种相应的法律。但在考古工作人员数量有限的情况下，如何统筹做好考古研究与文物保护工作，则成为非常紧迫的事情。对文物的机理现象进行分析，运用物理、化学方法进行研究与保护，是当前文物保护研究的发展趋势，而在这一过程中，客观上也促进了科技考古学的发展。

---

① 如周昆叔通过2 500年来气候变凉干的分析，得出了我国人口、政治、经济中心不断东移的主要成因，有利于我们认识当今和安排未来。见周昆叔等：《塑造现今地质地理环境的划时代事件——2 500年来气候变凉干及其影响》，《环境考古研究》，科学出版社1991年版。

第二章
科技考古学的基本含义

第一节 科技考古学的定义

一、科技考古学的命名问题

科技考古学,从某种程度上说,是正在形成与发展中的一门学科。所以,迄今为止国际上还没有一个统一的科技考古学名称。

科技考古学的称呼,是与自然科学的发展紧密相关的。最早的名词与物理学在考古学的应用直接关联。20 世纪 40 年代,Hawkes 教授提出 Archaeometry 的名称,意为物理科学在古代研究中的应用。1958 年,英国牛津诞生了一种名为 *Archaeometry* 的学术杂志。到 20 世纪 70 年代,化学、生物、地质等学科已同科技考古学的名称相连,科技考古被描述为将自然科学技术用于考古领域的遥感探测、年代测定以及化学分析,同时存在“生物考古”(即把生物科学用于古生物与古植物的研究,进而探讨其生存环境)和“地质考古”(即通过研究考古遗址的土壤、沉积和地形、地貌来探讨遗址的环境、沉积的形成以及保存于其中的生活历史)。在 1981 年第 21 届国际科技考古会议上,“科技考古的未来方向”专题讨论会基本认定科技考古是自然科学数据在考古研究中的应用与解释①。之后,国际上越来越多的

① 王全玉:《自然科学与社会科学嫁接的产物——科技考古学》,《世界科技研究与发展》第 20 卷第 3 期。

人们将考古中用到的各种科学技术纳入科技考古学范畴。

在已举办过的国际会议或专题讨论会上,出现了考古测量学(Archaeometry)、地质考古学(Geoarchaeology)、考古地质学(Archaeological Geology)、考古物理学(Archaeophysics)、考古地球物理学(Archaeogeophysics)、生态考古学(Ecological Archaeology)、动物考古学(Zoo Archaeology)、环境考古学(Environmental Archaeology)、数学考古学(Mathematical Archaeology)等与科技考古学相关的学科名词。

目前,欧美国家用 Archaeometry 一词说明自然科学在考古学中的应用。而在我国,还没有正式的科技考古学一词,比较习惯的说法是科技考古。甚至有人将科技考古学直译为 Archaeology of Science and Technology 或 Archaeological Science,这两种翻译从字面看不完全统一,且难以涵盖科技考古学的真正含义。

我们认为,Archaeometry 一词已使用多年,基本为大家所接受,其包含的内容,远比词汇自身的概念要宽泛得多,几乎囊括了前述与科技相关的所有考古学分支的概念,因此以使用这一名称为好。

二、科技考古学的定义

在对科技考古学进行定义之前,我们先回顾一下学术界有关这方面的不同认识。

(一)不承认科技考古学的存在,只承认科技考古

已经有许多学者意识到科技考古的重要性,并在实践中使用科技手段进行工作,但认为科技考古学并不是一门独立的学科。他们认为既然现代科技手段也是考古学研究中的一个手段,那就没有必要再将之列为一个学科。

在第21届国际科技考古会议上,学者们对"科技考古"进行了讨论,有些学者质疑,"科技考古学"能否与生物学、物理学、化学、考古学和人类学一样出现在字典中①。在中国,也有相当一些学者不承认科技考古学的存在。

这些学者对科技考古有一个基本的看法,即利用科技手段进行考古研究。更精确的表述是:自然科学领域的多种科技手段用于考古学研究和研究现代科技在

① Taylor R E. Archaeometry: The Meaning of the Term. In: Olin J S. Future Directions in Archaeometry. Smithsonian Institution, USA, 1982, 25－26.

考古中的各项应用技术等①,并强调科技考古具有传统考古学所不具备的功能。

(二)科技考古学是一门独立的学科,但有不同定义

也有不少学者认为,数十年来科技考古学从无到有取得了长足的发展,并已成为考古学中一个重要的二级学科,自然应是一门新的学科②,即科技考古学是成立的。但关于其内涵,尚存在不同的理解,基本上可归纳为三种认识:

(1)科技考古学是研究古代自然科学技术史的。科技考古学是对古代科技的探索活动,它在现代科技许多领域中仍然具有重大意义,乃至可以起决定性作用③。科技考古学属于科技史的研究领域,只是拓宽了业已存在的科技史研究④。比如每年的中国考古学年鉴中都包括"科技考古"一栏,其研究成果包括古代的天文历法、数学、物理学、化学、化工、地学、生物学、农学、医药学、印刷术、纺织、机械、建筑、造船和航海、军事技术等。王振铎著述的《科技考古论丛》(文物出版社1989年版)从考古的角度结合文献相关的科技知识考证,分析了古代科技如指南针、地动仪、鼓风机、飞车、铜漏等。李约瑟编著的《中国科学技术史》从纵横两方面论述了古代中国的哲学、科技思想、数理化天地生、工程技术及医学等,并与当时世界的其他古文明进行比较,成为"一部体大思深、结构严密的有关中国古代科学技术的百科全书"⑤。

(2)科技考古学是跨越自然科学和社会科学的一门交叉学科。它是通过现代科技方法来研究考古问题。具体说来,就是利用自然科学和考古学的理论、方法和手段,分析研究古代实物遗存,获取丰富的"潜"信息,以探索人与自然的关系以及

---

① 徐毓明在《文物科技学概论》(中国文物研究所编《文物科技研究》第1辑,科学出版社2004年版,第3、8页)中如此表述,且将科技考古的内容包括在了文物科技学中。

② 苏秉琦:《科技考古论丛——全国第二届科技考古学术讨论会论文集》序言,中国科学技术大学出版社1991年版;陈铁梅:《我国科技考古发展的回顾》,《中国文物报》1999年11月17日第3版。

③ 丁品:《科技考古,一个不应被遗忘的领域》,《中国文物报》1998年9月16日第2版。

④ 张忠培:《浅谈考古学与自然科学的关系》,《中国考古学:走近历史真实之道》,科学出版社1999年版,第150—151页。

⑤ 潘吉星:《李约瑟文集》,辽宁科学技术出版社1986年版,第25页。

古代人类社会历史的科学①。国际上类似的表述为:自然科学主要是物理学和化学在考古学中的应用,主要包括考古遗址的定位和观察、无出处的分散考古材料和器物的鉴定、古代材料和技术的分析与解释、年代测定、古代材料与器物产地确定②。俞伟超则进一步指出:"科技考古[学](——作者加)的根本目的还是人类社会和技术进步的历史过程,从而启示今人如何才能更好地适应环境,改造社会。"③

(3)科技考古学既包括对古代科学技术的研究,又指现代科学技术用于考古学研究中。严文明在迎接21世纪的中国考古学国际研讨会中指出,科技考古学"包括两方面的内容,一个方面是对古代科学技术的研究,如冶金、陶瓷、纺织、造纸、天文历法、农业科学等方面都有不少研究成果。另一方面是现代科学技术在考古研究上的应用,如各种测定年代的技术、探测技术、成分分析、制造工艺研究、保存科学研究、动植物遗存研究,孢粉分析和植硅石分析、环境考古等等"④。

我们主张科技考古学是指以现代科学技术手段进行考古研究,而不应该是其他。据此将科技考古学定义为:科技考古学是利用自然科学的理论方法和技术,分析古代实物资料,从中提取古代人类的活动信息,用以探讨人类行为、生存方式、生产技能以及人与自然的关系及其发展规律的一门学科。

以目前的情况看,科技考古学基本包括了以下三层含义:一是使用科技手段所获得的考古信息。在这一方面,科技方法的应用主要表现在遗存探寻方面,同时一些科技手段也可以在考古发掘中发挥作用。二是借以获得考古信息的科技方法和技术,包括探测技术、分析技术、保护技术等。三是科技考古学的理论性研究。科技考古学不断吸收、借鉴、融会自然科学和考古学理论与方法,逐渐创建自己的理论与方法体系。

---

① 王昌燧:《国际科技考古研究的现状与动向》(环境遥感考古专辑),《华东师范大学学报》1998年第4期。李士、秦广雍在《现代实验技术在考古学中的应用》(科学出版社1891年版,第362—363页)中说到,它是利用现代自然科学的实验技术和方法,对各类历史遗物进行测量、分析和鉴定,从而将考古学的研究推向严格的定量化,为研究古代文物提供更为可靠的依据,以弥补传统考古学方法的不足。

② Goffer Z. Elsevier's Dictionary of Archaeological Materials and Archaeometry. Elsevier Science B V, Amsterdam, The Netherland, 1996,24.

③ 俞伟超:《人文科学与自然科学的结合——在"现代科技考古研讨会"上的发言》,《文物》1999年第5期。

④ 严文明:《走向21世纪的中国考古学》,《文物》1997年第11期。

第二节　科技考古学的研究对象和目标

一、科技考古学的研究对象

科技考古学作为考古学的一个分支，其研究对象与考古学相同，即实物资料。实物资料作为物质遗存，“应该是古代人类通过各种活动遗留下来的，是经过人类有意识地加工的。如果是未经人类加工的自然物，则必须是与人类的活动有关，或是能够反映人类的活动的”①。实物资料通常包括古代的遗迹、遗物。遗迹一般指形体较大或固定不可移动的遗存，如古代的城堡、宫殿、村落、房屋、道路、沟渠、窑址、窖穴、洞穴、矿坑、作坊、墓葬及陪葬坑等。遗物一般指形体较小、可以移动的遗存，既包括古代人制造的工具、武器、日用器、装饰艺术品等器物，又包括生物（动植物）遗骸、遗存。过去由于种种原因，对人类有意识加工的产品研究较多，如陶器、城址、墓葬，目前考古学的许多研究成果也是建立在对这些人工产品的分析上，而不够重视与人类相关的自然物。

有些学者认为“考古学的研究对象，不是物质的遗存，也不是全部人类古代社会历史，而只是考古学文化所表述的这部分人类古代社会历史”。同时也认为“考古学文化，是表述分布于一定区域、存在于一定时间、具有共同特征的人类活动遗存的类别或不同群体的区分与联系，以及由它表述的人们共同体的历史演进过程”②。对于考古学文化，学术界目前没有多大异议，它注重的是共性，推崇从共性中寻找规律，当然它也包括个性的因素，但个性的研究通常是在对共性的认识之上再作考虑，有主次之分。应当看到，目前对于诸多具体的考古学文化仍存在较多争论，我们认为，只有着眼于其共性的探索才有可能达成共识，同时意味着对一些个别因素暂时不予考虑，可能更有利于问题的解决。而这一点，从搜集资料的环节就要注意到。考古工作者在发掘过程中应着眼于所有与人类有关的，包括人类创造的遗迹和遗物，尽可能去搜集更丰富的资料。即科技考古学所要关注的对象，首

---

① 夏鼐、王仲殊：《考古学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社1986年版。

② 张忠培：《关于考古学的几个问题》，《中国考古学：实践·理论·方法》，中州古籍出版社1994年版，第91—92页。

先应该是古代的遗迹、遗物,而不是考古学文化,以免影响研究的全面性。

与考古学相比,科技考古学研究对象的侧重点有所不同。它不一味将陶器等人类有意识加工的遗留物作为重点,而是将更多的注意力集中于与人类活动直接或间接相关的遗存分析上。器物的分类与制作、房屋的布局与结构、墓葬的葬式与葬具……相对变成第二位的研究对象,而地层遗迹中的花粉、动植物标本、人骨、兽骨(包括残缺者)的收集相对更受到关注。这些资料是过去所不被重视的,甚至常常不被采集和记录,其研究成果在考古报告中通常以附录形式出现,在简报中则放在"其他"或"备注"部分。科技考古学则不同,会对相关的资料和成果进行充分的表现和说明。对于古代的器物,考古学通常关注的是其外形上的异同及其所反映的考古学文化,科技考古学则是在分析这些器物的工艺、产地等科技因素,进而寻求其与考古学文化相关的互动联系。

就空间范围而言,考古学的研究对象应是指地球上的各个地方,但实际上,其工作范围长期以来基本上是集中于现在人类居住的地域,对于人迹罕见的荒漠高原、南北两极、森林丛木、海河大泽基本未涉足。而地球曾发生过多少次沧海桑田、天灾巨变,历史上的自然环境与当今的环境已有很大的变迁。一次地震就可将一个城市夷为平地,使得该地区不再适于人类生存,但其中确实掩埋有古人类的遗存。许多火山喷发处和地震易发区,可能埋藏着许多遗存,需要人们去发现。科技考古学正在填补这些空白,其在对更广阔时空范围进行考古学研究的功用日益凸显。沙漠考古、水下考古的兴起揭示了许多前所未知的古代文明。

二、科技考古学的目标

作为考古学的一个重要分支,科技考古学的最终目标同考古学保持一致,即"阐明存在于历史发展过程中的规律",既"要论证人类社会发展历史的一般规律,也要探求各个地区、各个民族在历史发展过程中所表现出来的差异点和造成这些差异的原因"①。

然而,科技考古学目前尚处于形成阶段,有待进一步发展。作为一门学科,既要有最终目标,也要结合实际有一个近期、可行的目标。科技考古学研究的内容广

① 夏鼐、王仲殊:《考古学》,《中国大百科全书·考古学》,中国大百科全书出版社 1986 年版。

杂,这是该学科的一个基本特点。目前,科技考古学的资料仍处于积累阶段,而在过去的工作中又忽视了许多实物资料;现有的科技手段尚未能很好地破译所有的考古信息。有鉴于此,我们认为现阶段科技考古学的目标,当尽可能地诠释各种考古信息,进一步探讨它们与人类的关系,最终要实现其演化规律和发展渊源的探索。

事实上,一些学者已做了这方面的工作。如将我国各遗址的孢粉分析结果进行归纳,可以看出,在我国北方地区距今11 000—8 500年前气候逐渐变暖,植被以榆树、桦树等落叶阔叶林为主;距今8 500—7 000年前的主要植被属暖温带落叶阔叶林,当时的年平均气温较现代高2～3℃;距今7 000—6 000年前的植被仍是落叶阔叶林,当时的气候温暖,降水量增加;到距今6 000—5 000年前与前段相似,气温曾一度下降;而距今5 000—4 000年前气温又回升到温暖湿润,以暖温带针阔叶混交林为主。[①] 周昆叔等人以海洋退缩、湖泊消亡和黄土堆积等地质事件探讨了大约距今2 500年这一时期的气候的重大转折以及2 500年来气候变凉干给我国社会带来的巨大变化。[②]

第三节　科技考古学的作用

科技考古学目前虽然处于形成之中,但其重要的学科意义已显端倪。主要表现在以下几个方面。

一、深化考古学的研究

科技考古学拓宽了考古学的研究范围,丰富了考古学的内容,揭示了更多的考古信息。以前囿于研究能力的限制,考古学家将目光集中在考古发掘的各种古代制品上,对其进行分类排比,研究器物的类型、演变,探讨文化的源流关系。随着科技手段的进步,考古对象则适时增加了反映人类生活环境、交通贸易、饮食结构、种植饲养以及生产能力的资料。

---

① 袁靖等:《中国科技考古五十年》,《考古》1999年第9期。

② 周昆叔等:《塑造现今地质地理环境的划时代事件——2 500年来气候变凉干及其影响》,《环境考古研究》,科学出版社1991年版。

科技考古学还促使考古学时空范围扩大,从空中到陆地、水下,它都可以进行探测,既可发掘陆地上的遗存,也可对水下遗迹、遗址进行发掘,从而深化了考古学的研究层次。

科技考古学为考古学研究提供了更精确的手段和信息。传统的类型学和层位学可以判定一件人工产品的相对年代,对其具体年代的测定和共存物的分析,更多地需要依靠现代测年技术(如^{14}C、热释光法、电子自旋共振法、加速器质谱法等)和检测分析方法(如X光探伤、化学分析、质子X光荧光、金相显微镜、中子活化分析等)。科技考古学获取了更多更准确的信息,增强了考古学的研究深度。

科技考古学显著提高了考古研究的工作效率。利用遥感和地面探测技术,可以在更大范围、更短时间内发现古代遗存。例如,采用脉冲瞬变电磁法,曾迅速而准确地探测了安阳殷墟王陵区和宫殿区的青铜器①。利用数学方法和计算机技术,为传统考古学提供了新的思维模式,考古学因此从定性研究转向定量研究,使速度得以提高,结论也更为准确。例如,陈铁梅利用多元分析方法,对陕西渭南史家墓地进行了分期排序,速度迅速,结论可靠。②

科技考古学为考古学理论的探讨提供了物质条件。20世纪中期以前,考古学的主要目的是再现、重建古代社会;五六十年代后,随着考古资料的积累和科技的发展,考古学的目标提升到以物见人。从50年代起,欧美考古学的主流即转向对古代文化生态和古代聚落形态的研究。③ 当今的研究者普便认为,从考古资料中可攫取更多的古代人类信息。考古学目标的变化在一定程度上得益于科技考古学的介入。考古学研究应将考古学、地质学、生物学、物理学、环境科学、数学、地理学等结合起来,进行多学科的综合研究,这已成为学者们的共识。

二、促进交叉学科的发展

20世纪中期以后,两种文化互相交融、渗透。所谓两种文化,即英国学者查尔斯·帕希·斯诺(C. P. Snow)于1959年在剑桥大学讲演《两种文化及再谈两

① 知源:《面向大地的求索——20世纪的中国考古学》,文物出版社1999年版,第278页。

② 陈铁梅:《多元分析方法应用于考古学中相对年代研究——兼论渭南史家墓地三种相对年代分期方案的比较》,《史前研究》1983年第3期。

③ 张光直:《当前美国和英国考古概况》,《史前研究》1984年第1期。

种文化》中所指出的：现代社会存在着相互对立的两种文化，一种是人文文化，一种是科学文化。

两种文化的交融是时代的要求，在互相渗透中出现了一批交叉学科和综合学科。这些学科运用自然科学和人文社会科学的方法，从科学、技术、经济、社会协调发展的视角，把人、自然界和社会看作有机的统一体。人类的历史是一个全方位的历史，任何事物之间都有着密不可分的联系。科技考古学自身发展的同时也对相关学科起到促进作用。科技考古学首先是借用自然科学的手段，同时吸收考古学的方法逐步发展。科技考古学在发展过程中也可以给这些交叉或综合学科提供详尽的资料，推动着其他学科的前进。比如环境方面的考古资料是关于古代人类与所处的自然环境的实物体现，科技考古学的工作人员对这类资料进行分析，以探索古代人类行为与周围环境的关系，为新的交叉学科探讨人与自然和人与社会的关系提供了一个可以比较的模式。再如古物保护促进了与之相关的化学、材料等方面科技水平的不断提高。

三、激发民族自信心、增强爱国主义和国际主义

古代科学技术的基因载体——实物资料凝结着古代先民的智慧，昭示给人们的是古代人类的生存能力、古人对自然的挑战以及坚韧和大无畏的精神，这无疑会激发人们的民族自豪感和爱国主义。国外流行这样一种做法，每当一个新的发明出现，第一件成品要送到博物馆进行收藏，其目的是为了向后人展示科技发展的历程。一条条贸易线路、一件件文化交流产品展现了古人的勇敢、热情，这些有利于今天的国际主义教育。“这种研究是以揭示历史本身面貌作为自己的唯一目的，对促进人民群众形成唯物主义历史观，激发他们的爱国主义、国际主义和民族团结思想情感有着重要的作用。”①

科技考古学所揭示的信息，可以使我们学习古代人那种兼收并蓄、包容博大的情怀和精神，有利于改革开放的实践。今天我们提倡学习国外的先进技术和经验，而考古遗存则可反映出古代世界人类的交往，特别是我国古代文化对国外的影响，两者表明了同一个意义：科学技术是没有国界的。

---

① 俞伟超、张忠培：《探索与追求》，《文物》1984 年第 1 期。

四、秉承历史，为现代化和未来服务

科技考古学对现代社会影响最成功的例子莫过于失蜡法与熔模精密铸造的关系。20世纪初，德国人用失蜡法铸造工业用齿轮。1929年，又对失蜡法进行改造，采用硅酸乙酯作为耐火涂料，用熔点达1 500℃的铬钨钴合金制成假牙。第二次世界大战期间，美国人奥斯汀在云南保山见到用失蜡法铸成的青铜器，大受启发，后来铸成了喷气发动机叶片和涡轮盘。之后，失蜡法技艺发展成为现代精密铸造技术，这是工业领域中古为今用、推陈出新的一个光辉范例①。古代传统工艺对现今的科技发展的作用是毋庸置疑的，关键在于今人如何从中更好地、更合理地汲取其所蕴涵的丰富科学内涵。

科技考古学在目前的知识经济时代，尤其是我国大力发展经济的过程中可起到很大作用。科技考古研究中依据古代的有关信息，与现代类似物进行比较分析，会产生意想不到的硕果。如农作物的起源对遗传育种的启示，丁颖研究了普通野生稻同籼稻的亲缘关系，用两者杂交培育出新的栽培稻品种。又如通过对湖北江陵汉墓出土的稻穗及其现代稻穗的分析，发现每穗的粒数遗传基因要比粒度变化基因活跃，从而为当今遗传育种获得了十分有用的信息②。

除了古代的科学技术外，古代在文化方面也给后人留下了一笔丰厚的遗产，它影响着后人的生活，丰富着后来的社会。泰勒的文化残余说详细论证了文化的传承和继受，他认为文化残余无一不是“文化进程中的里程碑”。一种习俗、一种技术或一种见解一旦流行于世，就有可能在很长时间内只受到极其轻微的外部干扰，因此它可以代代相传，如同溪水一旦进入河床就会终年累月流下去一样③。事实上，“适者生存”的自然规律不断淘汰着不适合时局的文化内涵，而“存在即事实”表明文化残余部分仍有可取之处，我们应谨慎而积极地取从。以秘鲁和玻利维亚的高原所发生的事件为例：空中摄影术和发掘的结果显示，大约在公元前1000年，在的的喀喀湖周围，至少有20万英亩（1英亩=4 046.86平方米）土地属于一种基

① 华觉明：《传统工艺的现代价值及其保护——从失蜡法谈起》，《中国文物报》1996年8月25日第3版。

② 严文明：《农业考古与现代考古学》，《农业考古》1984年第2期。

③ 陈雄正：《谈考古学中的民族学类比方法》，《华夏考古》2000年第1期。

于"凸地"的农业体系，该体系用地块间沟渠中挖出的泥土来抬高耕种表面，它非常适合于4 000米高度的地区环境，也适合于传统的块根植物。500年前，印加帝国征服该地区后，将这种耕作体系抛弃，代之以现代的农业方法，如大量的机械化、灌溉、施肥和进口谷物，事实证明，这种改革未能成功。颇有意思的是，当考古学家在清理完遗迹后，尝试只用传统工具在该地种植土豆和其他传统块根植物时，发现其农作物产量是干旱农田的7倍，而且迄今再也没有遭受到严重干旱、霜冻和洪水等灾害。现在，该地的人民已经开始采用他们祖先的耕作方法。① 正如德国考古学家西拉姆所言："我们需要了解过去的5 000年，以便掌握未来的100年"②。

① ［英］保罗·巴恩著、覃方明译：《当代学术入门：考古学》，辽宁教育出版社等1998年版，第28页。
② ［德］西拉姆著、刘迺元译：《神祇、坟墓、学者》，三联书店1991年版。

第三章

科技考古学发展简史

以学科角度而言，科技考古学的发展不过儿十年的历史，可大致分为萌芽期和形成与发展期两个时期。

第一节 萌 芽 期

20世纪上半叶之前，考古学经历了从建立到逐渐发展的时期，科技考古学处于萌芽期。

16、17世纪，西方社会各层人士纷纷收藏艺术品，这种古物学的热潮"是一部极其引人入胜的史话"。而"作为区别于艺术爱好和艺术史研究的正规历史古物学是16世纪在英国开创的"①。在对古物学研究的基础上，一些科学家做了相关的工作。如18世纪末，德国化学家克拉帕诺斯(M. H. Klaproth)自行设计了一套化学分析方法，用该法测试了古希腊、古罗马硬币，发现它们为铜基合金；他还分析了罗马国王提比略(Tiberins)别墅内的三块彩色玻璃马赛克，并讨论了其呈色机制。

19世纪初，北欧的古物学家对古物进行了深人的钻研，逐步掌握了古物分类的方法。1836年出版的《北欧古物导论》有效地传播了三期说。不久，三期说在北

① ［英］格林·丹尼尔著、黄其煦译：《考古学一百五十年》，文物出版社1987年版，第1版前言、第6、13页。

欧、瑞典、德国等欧洲地区先后得到检验和确认。19世纪中期,查尔斯·赖尔《地质学原理》的发表,标志着地质学中地层学,即根据岩层证据解释生物进化和均变规律理论的成熟。地层学是判明埋藏堆积年代的学说。地层学原理与考古遗存的堆积具有相似性,因而很快被移植、运用到考古学中,进而发展为考古层位学。19世纪后半叶,德国人亨利希·施里曼运用层位学发掘小亚细亚的特洛伊古城,证明了《荷马史诗》的真实性。意大利人吉赛普·菲奥雷利也用层位学方法发掘了庞贝古城。19世纪末,英国的毕德·里浮斯将军首次指出,同一考古学文化层内的遗物是共存的,由此可以判断遗物的相对年代。

考古学的最初发展史表明,从古物学发展到考古学,地质学发挥了最为关键的作用。之后,受生物学分类法的启发,古物学的分类法发展成类型学。20世纪初,瑞典人蒙德留斯(O. Montelius)对古物器型的分类作了系统的总结和阐述。考古层位学和类型学标志着近代考古学的诞生。柴尔德曾提到"地质学不仅教给考古学家划分年代的必要性,也指出科学断代的方法。地层学的原理即来自地质学……考古学的年代是通过类型学建立的。一群遗物的相对年代应当由其中的一些典型遗物来判别"。实际上,"欧洲之外的早期考古学的很多工作,是探险家和自然历史学家完成的"①。可见,考古学是在古物学的基础上,借用了地质学、生物学的某些理论和方法而产生的。

19世纪,科技考古的重点集中于文物的化学分析。19世纪早期,意大利科学家 Fabroni 发表了一篇分析出土金属成分的文章,指出高级、低级墓葬中埋藏黄铜和青铜之规律,即低级墓葬中埋藏的铜器皆为黄铜,系对高级墓葬中金首饰的仿制品。1842年,德国的戈培尔(F. Gobel)注意到化学分析和考古遗存间的联系,通过对俄国波罗的海出土的黄铜器的分析,指出这些铜锌合金应源自古罗马。之后不久,奥地利的沃赛尔(J. E. Wocel)分析了古代金属文物,根据成分数据的统计处理,提出了化学性质群的概念。19世纪60年代,法国的达牟(A. Damour)分析了凯尔特人的硬质石斧、黑曜岩制品,指明了它们的矿物来源。他还发现文物的化学成分和地质特征与其矿物来源密切相关,呼吁自然科学家给考古学家以切实的关心和支持。1895年,美国的理查德(T. W. Richards)分析了波士顿精美艺术博物馆

① 张光直:《考古学和中国历史学》,《中国考古学论文集》,三联书店1999年版,第23页。

的一批古雅典陶器，推测了其产地，并提出了重要的研究理念，即样品群中，若各个样品的某一元素含量集中在狭窄的范围内，预示它们来自有限的地理源；建立相当规模的"数据库"，将待分析样品群的测试值与之比较，是系统研究文物产地的前提。此外，1888 年，在柏林 Konigliche 博物馆成立了第一个文物保护与科学研究实验室，表明文物保护已经得到重视。

科学技术的新发展，改变了人类传统的生活，也加速了各学科前进的步伐。20 世纪初，莱特兄弟发明了飞机，使航空摄影、遥感技术随之产生。20 世纪上半叶，发射光谱开始用于青铜器成分的分析，开了用科技仪器分析文物的先例。

近代考古学一旦出现，就表现了它旺盛的生命力。在西方，近代考古学主要集中于史前考古，因而有人称之为史前考古学。由于史前考古学文献资料的缺乏，人们不得不借用、引人自然科学方法。在考古学的发展过程中，伴随着考古调查和发掘的科学化进程，科学技术的理论和方法得到一定应用。尤其是第一次世界大战后，科学技术的快速发展，使科技手段在考古学中的应用更见增多。例如，开始将地阻率测试仪和空中摄影技术应用于遗址勘探；应用动、植物学方法鉴定兽骨、农作物品种，并用孢粉分析了解古代植被；人骨的研究导致了体质人类学的产生和发展；采用化学、物理学方法，分析各种人工制品的结构和成分等。

我国考古学的形成与西方考古学的历程大体相同。它的前身是中国金石学，相似或对应于西方的古物学。20 世纪 20 年代西方的近代考古学传人我国，中国的近代考古学产生了。中国近代考古学的兴起，除了以金石学为基础外，还有西方传来的科学，当然包括地质学和考古学本身[①]。

还在近代考古学传人中国之初，自然科学方法的应用就受到重视。1926 年，梁启超在《中国考古学之过去与将来》的讲演中提及"新方法的引用"，他指出，"例如有地质学的知识，可以用崖层状况，以判定时代的早晚；有人类学的知识，可以考出头颅骨骼的派别。这类科学，于考古方面，直接间接，裨益甚大。我们一方面要得前人所未得的资料，一方面要用前人所未用的方法，从荒榛断梗中，辟出一块田园来"[②]。此外，我国考古学的产生，也同当时国外一些所谓"探险"者 20 世纪初在我国西北、东北的考古发掘活动有关，如同李济描述的"地质学家、地理学家、古生

① 夏鼐：《五四运动和中国近代考古学的兴起》，《考古》1979 年第 3 期。

② 梁启超：《中国考古学之过去及将来》，《重华月刊》1931 年第 1 期。

物学家以及各式的冒险家，蜂拥到远东特别是中国"①。其中以斯坦因、斯文·赫定、伯希和、桔瑞超、滨田耕作、桑志华猎取的"宝物"最多，这些探险者对"地质地文气象植物俱各有所阐发"②。20世纪二三十年代，北洋政府在自己的国宝被拿到国外博物馆展出陈列后，开始主动聘请外国学者和学术团体来我国进行合作发掘，著名的有瑞典地质学家安特生、加拿大人类学家步达生、法国古生物学家德日进。1928年"中央研究院"历史语言研究所成立，并在同年10月派董作宾前往安阳小屯进行调查和发掘，这是中国考古学诞生的重要标志。1928—1937年历史语言研究所对河南安阳殷墟进行了15次发掘，收获颇丰。

从1928年至1948年，经过20年的发展，中国考古学作为一门新兴的学科，已经粗具规模。中国学者摸索出一套适合中国特点的田野工作方法，积累了一批通过正规发掘获得的科学资料③。在考古学的形成时期，学者们已经注意自然科学方法的应用，如对周口店和殷墟的人类骨骼、动物遗骸的分析，对仰韶文化和龙山文化陶器的质地和加工技术的研究等。

以上事实表明，考古学从诞生之日起，就与自然科学方法和技术密不可分。借用地质学、生物学的成果建立了考古层位学和类型学，而且在发掘过程和资料研究中注意到了科技手段的应用；发掘工作中既有考古学家，也有地质学家和生物学、人类学方面的专家参与。这一时期是考古学理论和工作的科学化形成期，考古层位学和类型学得到积极实践，考古学文化研究取得一定成果。然而，自然科学技术在考古中的应用毕竟未形成规模，科技考古学仅初露端倪。

第二节 形成与发展期

从20世纪50年代至今，可视为科技考古学的形成与发展期。该期又可分为两个阶段，第一阶段自20世纪50年代至80年代，是科技考古学的形成和初步发展期；第二阶段从20世纪80年代至今，是科技考古学的再发展期。

---

① Li Chi. Anyang. University of Washington Press, 1977, 34。

② 向达译：《斯坦因西域考古记》，中华书局1936年版，第300页。

③ 王世民：《中国考古学简史》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社1986年版。

一、形成和初步发展期

当考古学经历了“成熟期”和“发展期”①而充分成熟后，学者们的学术视野进一步扩大，科技考古学受到考古学者们的关注。1949 年，美国的利比（W. F. Libby）创立了^{14}C测年方法，解决了古代遗址的绝对年代问题，这是考古学史上一个重要的发展标志，考古学的研究从此摆脱只能定性描述的阶段，开始了定量表述的时代。^{14}C测年方法的建立和被称为科技考古“麦加”的牛津大学“考古与艺术史研究实验室”的建立，标志着现代意义上的科技考古（学）的开端②。

这一阶段科技考古学的发展主要体现在三个方面。一是关于古代科技方面的资料积累和研究，如冶铸技术、机械制造技术、建筑技术、医药卫生知识、农田水利技术等。西方国家主要集中在史前时代的研究，如探讨农作物的起源、石器工具的制造技术和方法等；而我国这一时期则可看做是资料积累的过程。二是科技手段广泛应用于考古研究中，突出体现在测年断代方面。放射性碳素断代（Radiocarbon Dating）在考古年代测定上的成功应用，使确定史前文化的绝对年代、梳理不同文化间的年代序列成为可能，使史前文化的研究更为科学化、系统化，由此引起“史前考古学上的一次革命”③。除放射性碳素断代外，这一时期应用于考古学上的断代测年方法还有：热释光法、古地磁法、钾－氩法、树木年轮法、铀系法、裂变径迹法和黑曜岩法等。与断代测年方法相比，其他应用于考古中的科技手段，大多处于初始阶段，尚未形成体系。例如，将电磁测定法和传统的勘探法相结合，用于探寻遗迹；一些现代科技分析方法如 X 射线荧光分析法、电子探针法、中子活化法等，开始用于遗物成分的测定；采用计算机贮存考古信息，也开始了有益的探索。三是考古分支学科逐渐创立，如环境考古学、农业考古学、动物考古学、实验考古学、植物考古学、地质考古学等。

这一阶段科技考古学的发展在国内外表现不同。

在西方国家，早在 20 世纪三四十年代，许多人类学家、考古学家对传统的考古学即提出了质疑，认为考古学的研究目标不是器物而是人。1948 年，美国青年学

① 夏鼐、王仲殊：《考古学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社 1986 年版。

② 陈铁梅：《我国科技考古发展的回顾》，《中国文物报》1999 年 11 月 17 日第 3 版。

③ 夏鼐、王仲殊：《考古学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社 1986 年版。

者瓦特·泰勒在其博士论文《考古学的研究》中,对传统的考古学进行了批判,他强调应重视研究人工制品间所反映的人们的行为,应采用综合方法作全面的研究。到50年代初期,美国考古学在方法上有了一个很大的改变,出现了聚落形态的研究。这不是一个观念上的理论体系,而主要是在考古作业上的一个非常具体的方法体系①。1953年,戈登·魏利(G. R. Willey)出版了《秘鲁威鲁河谷史前聚落形态》一书,该书在广泛调查的基础上,结合地理学提出如何进行聚落形态研究,怎样把人与自然环境、自然资源结合起来②。1952年,克拉克(G. Clark)写成《史前欧洲》(Prehistoric Europe),他认为要把非常细致的发掘工作与其他学科,包括地层学、生物学、古动物学、古植物学,以及环境科学、实验室科学等非常密切地结合起来,尽量用各种不同的科学方式以及非常仔细的发掘来采集古代遗址里的动植物遗骸进行综合研究,以详细地反映古代居民的生产活动和生活活动③。

与此同时,科技手段日益得到广泛应用,如20世纪50年代用^{14}C测出马耳他神庙早于金字塔的时代,巨石文化比迈锡尼文化早④。"原子弹之父"奥本海默(J. R. Oppenheimer)也提出将中子活化法用于文物产地的研究,1954—1956年,他多次邀请美国的赛耶(E. V. Sayre)和道德森(R. W. Dodson)与考古学家系统讨论中子活化分析与文物来源间的关系。随后,两人成功地用中子活化分析法研究了地中海地区古陶器的产地。20世纪60年代,"卡尔文途径"、"哈-斯途径"、CAM途径的发现,使古代食性分析开始兴起。

20世纪60年代,新考古学派首先在美国,接着在英国和其他欧洲国家出现。新考古学派给传统考古学以猛烈冲击,对后者提出质疑,认为考古学的目的不是重建、复原过去,而应是研究古代人类生活(包括物质、精神和社会关系等方面),强调生态环境对人类生存的制约作用。新考古学派有自己的一套研究方法,产生假设再去实验验证,在研究过程中广泛使用社会学、生态学、生物学、地质学、地理学、经济学的原理和方法。新考古学派掀起了人们对考古学理论和方法的探索,人们

---

① 张光直:《当前美国和英国考古概况》,《史前研究》1984年第1期。

② Gordon R W. Prehistoric Settlement Patterns in the Viru Valley. Peru, Washington D C. Smithesonian Institution, 1953.

③ 张光直:《当前美国和英国考古概况》,《史前研究》1984年第1期。

④ 俞伟超、张爱冰:《考古学新理解论纲》,《中国社会科学》1992年第6期。

已经普遍意识到要对考古学解释的本质有一个更充分的理解，由此形成了相应的解释范式和理论，如历史复原法、假说—演绎法、系统行为研究法、新马克思主义、结构主义，其中有些由于不很完善而存在着相互矛盾的地方①。新考古学派形成及其后的20年里，对考古学遗存的阐述上升至文化、历史规律的高度。由于研究的需要，不得不借用、吸收其他学科的理论和方法，尝试用模式解释人类行为、用数理进行分析等探索。例如，1968年克拉克出版的《分析考古学》就是新考古学家在计算机帮助下运用数理分析进行研究的尝试。新考古学派由于过分强调现代科学技术和演绎推理的作用，过分依赖其他学科新的手段方法，而没有对考古材料本身进行充分的研究，最终没有达到原设目的。但是，新考古学派对考古学，尤其是科技考古学的推动作用是不可埋没的。

中华人民共和国成立之初，百废待兴，开始进行大规模的经济建设。为配合基本建设的需要，再加上人员的不足，考古工作者将精力集中在抢救性、配合性的调查和发掘上，考古学资料迅速积累，却难以及时整理与研究。与此同时，"一切学苏联"的风气影响贯彻到各个领域，考古类型学和层位学、文化人类学因系西方传入而被视为资产阶级的伪科学，考古工作基本处于停滞状态。"文化大革命"结束后，痛定思痛，人们开始了对学科的反思，考古类型学、层位学重新得到认可和应用，苏秉琦在多年的研究基础上，提出了具有中国特色的多元观点的区系类型学说。这一时期，中国考古学发展的主流集中于田野发掘与资料整理及学科理论的建立和探讨。

值得庆幸的是，由于夏鼐等一批学者的鼎力提倡，科技考古学在缓缓起步。20世纪50年代初南京博物院发掘宜兴周处墓时特请自然科学家测量出土物的化学元素。^{14}C测年法在国际上刚刚出起，夏鼐就及时向国内介绍并于1959年筹办实验室，1965年中国社科院考古研究所建成我国第一个^{14}C测年实验室，②1972年首批^{14}C年代测定数据公布。1977年，夏鼐运用碳素年代数据，全面系统地排列了中国新石器时代考古学文化序列，他认为碳素年代为建立中国史前考古学编年体系的

① ［美］科林·伦福儒：《对考古学解释的反思》，见张忠培主编：《中国考古学：实践·理论·方法》，中州古籍出版社1994年版，第328—343页。

② 陈铁梅：《我国科技考古发展的回顾》，《中国文物报》1999年11月17日第3版。

框架，提供了一个以现代自然科学原理为依据的坚实可靠的基础。[①] 在环境研究方面，20 世纪 60 年代初就对半坡遗址发掘的采样进行了孢粉分析和动物骨骼鉴定[②]。70 年代竺可桢对中国近五千年来的气候变化作了总结[③]。这一阶段，其他的断代、分析和鉴定技术开始了应用，对古代人骨的鉴定也积极开展起来[④]。考古学还同其他学科如建筑、地震、水文、艺术等开始结合进行综合性的研究。

二、发展期

20 世纪 80 年代至今，随着新考古学风潮的衰退，后过程考古学兴起，强调没有单一的、正确做出考古推论的方法，允许各种声音并存。考古学研究呈现出世界化的趋势。高科技、信息的发展以及生存空间、环境的现状迫使各个领域的学者们更多地关注人类的生存发展史和现代社会的关系，因面考古学的研究更加务实，与现实生活的结合更加密切。科技的发展提供了必要的物质条件，也为多学科合作提供了广阔的空间，合作趋势和成果愈来愈明显，科技考古学因面备受重视，处于发展的阶段。

这一时期科技考古学呈现出以下几个特点。

第一，出现世界化的格局。近代考古学在各国各地区已取得了基本成功，文化框架谱系基本建立，若干考古学文化特征基本明了。而欧美等西方国家历来注重史前学的研究，由于本身国土考古资源的缺乏，对石器时代的研究便集中在东非、东南亚、中东、中美洲和南美洲等地。各国学者把本国的考古信息收集齐全后，总是将其置于世界范围内进行比较分析，以期得到更深层次的成果。

第二，参加的工作人员多学科化。人们逐渐意识到过去考古发掘工作主要关注器物方面，忽视了许多其他的现象和遗迹，而对这些现象规律的追寻又有助于对现代生存环境、人类生活的理解。一个考古工地的发掘，不再是由考古工作者独自进行，需要相关学科如动物学、植物学、人类学、地质学、环境科学、物理、化学、计算

---

① 夏鼐：《碳－14测定年代和中国史前考古学》，《考古》1977 年第 4 期；周星：《夏鼐先生与中国史前考古学》，《史前研究》1985 年第 4 期。

② 周昆叔：《西安半坡新石器时代遗址的孢粉分析》，《考古》1963 年第 9 期；李有恒等：《陕西西安半坡新石器时代遗址中之兽类骨骼》，《古脊椎动物与古人类》1959 年第 1 卷第 4 期。

③ 竺可桢：《中国近五千年来气候变迁的初步研究》，《考古学报》1972 年第 1 期。

④ 颜訚：《甘肃齐家文化墓葬中头骨的初步研究》，《考古学报》1955 年第 9 期。

机数学等学科的专家参与,以便获得更全面的信息。以旧石器时代的研究为例,此阶段研究一般主要包括化石人类学、考古器物学、环境科学、灵长类行为、现代渔猎民族行为及生活的研究①。要完成这些研究工作,非得多学科的人员参加不可。另外,各学科的专家配合默契,能有效全面地开展工作。如对农作物起源的研究,由于考古学和古植物学、古动物学等学科专家的密切配合,捋清了许多农作物的发展历程,即从野生的小个体发展到人工栽培的大个体构成了农作物的全部发展历史,并找到了植物栽培发展的动力②。

第三,科技考古研究贯穿了考古学研究的始终,而且各方面的研究基本形成系统化,并做到了同多种方法结合进行研究。用遥感技术、探地雷达、地球物理方法、声呐技术开展考古遗址的调查和勘探;^{14}C、热释光、加速器质谱仪、电子自旋共振、穆斯堡尔谱学等断代法是断定年代的主要方法;对于器物的化学成分和结构分析,广泛采用扫描电子显微镜、红外吸收光谱、穆斯堡尔谱学、X射线荧光分析、中子活化分析、热分析技术、原子吸收和原子发射光谱、X射线衍射、质谱和色谱及同位素分析等方法;使用浮选法、植硅体、孢粉分析食物结构;用^{13}C、DNA来确定性别、种属食谱、遗传基因及病理病变等;数学方法、计算机技术的广泛使用使考古的定量研究成效斐然;在摄影方面,采用航空摄影、红外及紫外线和X射线照相;等等。值得一提的是,1993年美国的米勒斯发明勒聚合酶链式反应(PCR),推动了古代DNA研究的进展。

第四,国际性会议频繁召开,国际性杂志较多出版。每年年度的各学科学术讨论会上都有与科技考古相关学科的内容探讨,如美国科技考古学会、第四纪协会、美国考古研究所、美国考古学会的年会上都有最新的科技考古方面的介绍和总结。此外,间隔两年或一年召开的国际科技考古学术会议(International Symposium on Archaeometry)至今已举行了35届。另外,一些边缘学科、交叉学科的国际性杂志兴办起来,如*Archaeometry*, *Archaeological Chemistry*, *Science and Archaeology*, *Geoarchaeology*, *Journal of Archaeological Science* 等。

第五,科技考古学工作趋于理性化、科学化。在西方,欧美国家新考古学派在实践中所取得的最终结果与设定的目标距离太远,且与考古有些脱节,现实使学者

① 张光直:《当前美国和英国考古概况》,《史前研究》1984年第1期。

② 张光直:《当前美国和英国考古概况》,《史前研究》1984年第1期。

们意识到，真正的过去是永远不可能完全复原的。同其他学科一样，学科的发展是一个永无尽头的攀登过程，人们更加务实，在重视发掘的同时，应尽可能多学科参与，最大限度地利用科技手段，尽可能进行多方位的综合研究。

在我国这一阶段，科技考古学既同国际接轨，又有自身的特点。

第一，我国的科技考古比西方起步略迟，但速度较快。20世纪80年代中期，国外的考古学理论与方法被介绍到中国，随后掀起了对这些国外理论、方法的探讨，对新考古学派及聚落考古、环境考古方面的讨论尤多。90年代在肯定我国考古工作已有成绩的基础上，我国考古学界加快了科技考古研究的步伐，努力追赶国际考古学的发展。在国家自然科学基金委员会的资助下，北京大学建成了加速器质谱^{14}C测年装置，扩大了测年对象的范围，而且我国发表的每一本报告集都有详细的^{14}C数据。科技讨论会越来越多，20世纪80年代末至90年代初，以断代测年、冶金技术、古陶瓷研究为主要议题的中国科技考古学术讨论会召开了5次。在苏秉琦、刘东生、侯仁之的支持下，周昆叔组织召开了两届全国环境考古学会。中国历史博物馆俞伟超组织了多学科结合的班村遗址的发掘，邀请动物、植物、地理、地质、理化等学科的专家，开展综合研究。

学者们在大量科技考古工作的基础上，适时地进行了总结和回顾。陈铁梅发表了《我国科技考古发展的回顾》一文（《中国文物报》1999年11月7日），袁靖等总结了《我国科技考古五十年》（《考古》1999年第9期）。历年的科技考古学术讨论会从不同的角度进行讨论和研究，并出版了《科技考古论丛——全国第二届科技考古学术讨论会论文集》（中国科学技术出版社1991年版）。此外，仇士华、蔡莲珍等人亦在科技考古方面做了具体详尽的工作，周昆叔等人在环境考古方面进行了论述（《环境考古研究》，科学出版社1991年版），金国樵等人则出版了《物理考古学》（上海科学出版社1989年版），宋宝泉出版了《遥感考古学》（中州古籍出版社2001年版），景爱在新疆等沙漠地区做了大量的考古工作（《沙漠考古通论》，紫禁城出版社2000年版）。

第二，注重文物物质结构、产地等的分析。我国科技考古学的一个突出特点就是古代陶瓷、古代冶金技术的研究贯穿于新中国建立之前和之后，且始终处于世界研究的领先地位。上海博物馆热释光测定年代长期处于国际领先地位，这不能不说与它的鉴定对象——陶器的来源丰富有关。中国科学院上海硅酸盐研究所长期以来对我国陶瓷器的制作工艺进行了大量而系统的研究，“总结出我国陶瓷发展

的五个里程碑，涉及原料选择精制、窑炉改进和瓷釉进展的发展过程。硅酸盐研究所的工作可以说是引导了国际古陶瓷研究的方向"①。对青铜器的研究不满足于金石学的考证，开展了结构成分、表面状况、性能、制作工艺、产地来源和演变过程等的分析与研究。

第三，对科技考古学进行了分类研究，出现了看好的研究成果。将科技考古学基本划分为年代学研究(或称断代技术)、分析技术(或称物理化学分析研究)、环境考古学研究、动植物学研究、人类学研究、考古勘探(或称勘测技术)、考古计算技术(或称数学与计算机技术)，尤其在前三类的研究中取得了系统化的成果。分类研究的成果集中反映于有些考古报告和相关著作中。《舞阳贾湖》(科学出版社1999年版)是比较成功的成果案例，该书分为上下卷，上卷是典型的传统的考古报告，描述了该遗址的文化内容、分期、年代、性质与周围文化的关系；下卷分古环境研究、人类学研究、稻作农业、渔猎采集与家畜饲养、技术、工艺研究、贾湖遗址聚落形态、原始宗教、契刻符号研究、骨笛研究等章节，各类研究既独立，又互相关联，是分类研究与综合研究的集中反映。

第四，国际合作愈来愈多，经常与美国、德国、英国、意大利、日本、法国、加拿大、澳大利亚等国家共同研究。研究项目涉及人类起源、农业起源、文明起源、环境考古、文物保护诸多方面；在遥感考古、地球物理方法、地理信息系统(GIS)方面颇有成效，如中美合作成功完成了对颍河上游的考古调查②。由于受资金等方面客观条件的限制，与拥有先进考古工作技术的发达国家合作成为一条迅捷的成功之路。与此同时，各种科技考古会议不断召开。例如，至2004年已召开了七次中国科技考古学术会议，学者们交流了科技考古与文物保护领域的成果，且出版了论文集。

第五，大型的课题研究推动了科技考古学的发展。夏商周断代工程由考古学家、古文字学家、历史学家、天文学家、^{14}C测年专家共同参与，取得了一些突破性的进展。"正在酝酿中的'我国文明起源研究'工程中同样给科技考古以不可或缺

① 陈铁梅:《我国科技考古发展的回顾》,《中国文物报》1999年11月17日第3版。

② 中国河南省文物考古研究所等:《河南颍河上游考古调查中运用GPS与GIS的初步报告》,《华夏考古》1998年第1期。

的地位。"①一些专题性的科研项目,拓展和深化了科技考古学的研究内容。中国社会科学院考古研究所、北京大学考古学系等单位开展的"胶东半岛贝丘遗址环境考古学研究"、"甘肃葫芦河流域古文化与古环境"等课题研究,都取得了重要成果②。

第六,学术机构的建立和人才的培养。科技考古研究已进入到从单兵作战到集体行为,从自然科学家客串到考古学家主导的局面。20世纪90年代,由中国社会科学院考古研究所、北京大学、北京科技大学、中国科技大学联合筹备的"中国科技考古学会"得到了国家科学技术部和中国科学技术协会的批准。与此同时,不少机构如中国社会科学院考古研究所、中国历史博物馆、北京大学、中国科学技术大学、吉林大学、华东师范大学等单位,成立了科技考古的有关研究室和专业或系,培养科技考古方面的人才。

第三节　科技考古学前瞻

在国内外学者的努力下,科技考古学已取得了可喜的进展。然而,作为一门新兴学科,在许多方面尚有待进一步发展和完善。

一、逐步确立学科理论体系

在对科技考古学的认识不断加深的过程中,应重视建立自身的理论体系,包括学科目标、理论和研究方法。这是国际范围内需要关注的问题。目前,至少在我国已对科技考古学的理论开始有了认识和探索,俞伟超指出,"科技考古[学](——作者加)的根本目的还是揭示人类社会和技术进步的历史过程,从而启示今人如何能更好地适应环境,改造社会"③。但总体来看,这方面的研究进展还较缓慢,有待于重视和加强。

① 陈铁梅:《我国科技考古发展的回顾》,《中国文物报》1999年11月17日第3版。
② 陈星灿等:《二十一世纪考古学的展望》,《东南文化》2000年第1期。
③ 俞伟超:《人文科学与自然科学的结合——在"现代科技考古研讨会"上的发言》,《文物》1999年第5期。

二、加强学科之间的交流

科技考古学的研究应当追求信息的全面性，不断丰富和充实研究内容。要注重多方位的交流和探讨，既包括国际范围的互通信息与学习、借鉴，也包括不同研究领域资料与方法的借鉴与渗透。可以这样说，学科的发展除了考古学者们的努力外，还要靠其他学科的推动。“事实证明，不同学科之间的交流和合作，可以起到扬长避短、事半功倍的作用”①。这方面，夏商周断代工程多学科研究的成功尝试，同样是一个很好的说明。

三、科技考古学方法的更新和完善

科技考古学的出现，本身就是考古学同其他学科结合的结果，其方法和手段非考古学所专用，因而在现阶段有些方法的应用还存在一定的不足和缺陷，有待在实践中不断改进和完善。如脂肪酸分析法，由于现存物种的数据难以且不可能收集齐全，那些已消失的物种更难以收集，但缺少这些数据就很难进行对比和研究；温度和环境的变化对脂肪酸变质有影响；炊食具调理过许多材料，有时单靠脂肪酸和固醇的分析还难以区分物种；土壤中混入绿肥、鱼骨粉等肥料和其他动植物遗体的脂肪时，亦难以区分物种。为了解决这些问题，日本学者在研究中将脂肪酸分析法、DNA 分析法和免疫学的氧抗体法并用，进行综合研究，有较好收效②。遥感信息处理与分析技术具备系统遥感获取与处理分析能力，若能与 GIS 和全球定位结合研究则效果更佳③。

对考古遗存的定性、定量分析极为必要，这就需要广泛使用数学方法和计算机信息处理技术。除对各种实物进行数理统计、量性分析、演绎推理外，还可以建立考古学数据库、考古文献目录库、考古学电子工具书，进行文物聚类分析和文化脉络综合研究。文化区系类型也很适合以这种方法处理。可惜目前这些新技术与研究力量不相配，因为不少有经验的学者对这些知识的了解有限。可喜的是，目前在

---

① 俞伟超：《人文科学与自然科学的结合——在“现代科技考古研讨会”上的发言》，《文物》1999 年第 5 期。

② 蒋丽金：《两院院士谈科教兴国》，《新华文摘》1999 年第 11 期。

③ 郭华东：《遥感知识创新展望》，《中国科技信息》1999 年第 15、16 期合刊。

北京大学和吉林大学考古系均已将定量考古学课程设定为学生的必修课。定量研究将推动我国整个考古学研究水平的提高。

四、科技考古学队伍的扩充

从目前的情况看，从事科技考古研究的学者，人数并不多，而且基本上有一个固定的圈子，其学科背景多为理工科出身，人文学科基础相对薄弱，有些学者甚至只是以考古材料做其他相关学科研究。另一方面，经过考古学专业训练的学者，自然科学知识又相对欠缺，甚至有些学者对科技手段的引入持怀疑态度。这样，目前科技考古学的学者队伍与考古学的发展态势就有一定的差距，如何拉近这一距离，是科技考古学下一步值得重视的工作。当然，已经有不少自然科学和考古学的专业人员互相走进对方的领域，这说明科技考古学的队伍正在扩大。

现有状况也给培养适合科技考古学发展的人才提出了新要求。他们不仅要掌握自然科学的专业知识，同时也要接受人文社会科学的熏陶。较多的高素质、复合型人才的加入，有望促进科技考古学学科的发展。

第四章
科技考古学的理论和方法

科技考古学受科学的理论指导，遵循考古学的基本理论；其研究方法既遵循考古学的一般原则，又应具有其自身的特征。在目前的情况下，基本可作如下的理解。

第一节　理　　论

一、均变论

均变论（Uniformitanrianism）的思想主要由英国地质学家赫顿（J. Hutton）和赖尔（C. Lyell）创立。1795年，赫顿发表了系统阐述地质均变思想的著作——《地球的理论》，指出地球是由自然和持续的过程所塑造的，“我们处在当今的自然界状态中，必须参考过去的记录。而在参考过去的记录时，我们除了依赖由科学归纳的理性确立的自然规律外，再没有其他的东西”。均变论的名称及内容阐述则是查尔斯·赖尔在其《地质学原理》一书中表述的，该书的副标题是“将今论古解释地球表面变化的一种尝试”（Principles of Geology, Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Causes Now in Operation），他认为地质学古代的情况本质与现代类似①，所以要“以现在还在起作用的原因解释地球

① ［英］格林·丹尼尔著、黄其煦译：《考古学一百五十年》，文物出版社1987年版，第26页。

表面的变化”。

均变论的思想概括起来包括两点：一是古今一致的地球观。认为地球表面发生的各种作用无论过去、现在和将来都是相同的、一致的。地球上的物质始终在正常的、不变的力量作用下演变着。二是将今论古的方法论。坚信现在是了解过去的钥匙，地球表面在历史上发生的种种变化，完全也只能用当代人类所见到的地质作用来解释。

均变论是人类认识史上最重要，也是最有意义的一次科学思想的变革，它对地质学、自然科学、哲学的贡献是巨大的，正如恩格斯所说，“只有赖尔才第一次把理性带进地质学中。因为他以地球的缓慢的变化这样一种渐进作用，代替了由于造物主的一时兴发所引起的突然革命”①。但是，随着科学的发展，均变论的局限性越来越明显，如它从逻辑上必然导致固定论②。

尽管如此，均变论的思想仍是科技考古学的一个理论基础，只不过我们不再是机械地理解均变论，而是借用它的思想。古今一致的观点是我们研究古代文化、生物的认识起点，地球上的一切物质都在不断地演变，尽管古今可以类比，但两者绝非完全相同。

均变论给科技考古学最大的指导莫过于将今论古的方法，赫顿在《地球的理论》中提到“为了理解过去自然的作用，就必须研究现在地球的构成，进行了这方面的研究，才能知道决定事物未来方向的原理”。用现在还在发生的情况去解释过去的发展，在一定程度上反映了自然界本身矛盾的运动规律。我们所说的由今及古的方法是，以今天为参考，把晚近时期总结出来的种种模式作为一种考察工具，去探索过去。

当然，任何探索历史的学科都可以说是今人以自己的理解去诠释过去，这种做法本身就是以今论古。从考古勘查、发掘到整理、分析，所用的方法以及对材料的理解都是从研究者本身的学术经历出发，受当代学术水平的影响和限制。

此外，均变论实际上还表述了发展和普遍联系的思想，任何事物都经历了产

---

① ［德］恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社 1984 年版。

② 许多学者已经对均变论的局限性以及对地质学的阻碍作用进行了分析，诸如王建华在《板块学说与均变论》（《福建地理》第 11 卷第 1 期）、何起祥在《地球科学思想的发展——历史的回顾与展望》（《海洋地质与第四纪地质》第 23 卷第 3 期）等文章都有论及。

生、发展、消亡的过程，其兴衰历程有一定的规律可寻，从中可以总结其发展的矛盾性和飞跃性的线索。在此基础上，可以以古推今，来进一步检验以今及古所得出的种种模式的正确性和可行性。

二、进化论

1859年，达尔文发表了《物种起源》，创立了生物进化论。进化论（Evolutionism）打破了"上帝造人"的臆说，确定了人类起源的生物学规律，给自然界的客观辩证法提供了令人信服的科学证明，被恩格斯称为打破近代机械主义"僵硬的自然观"的伟大学说之一[①]。时至今日，进化论已从达尔文所创立的古典进化论发展到新进化论[②]，给考古学带来了很大影响，指导科技考古学的发展。

从进化论的历程看，达尔文生物进化论形成的前提是赖尔的均变论。赖尔首先把进化论的哲学思想运用于解释岩层证据来反映生物进化的人，他把这些证据称之为"古生物证据"。达尔文正是阅读了《地质学原理》一书后才设想了进化论的全部理论[③]。达尔文进化论主要阐述了变异、繁殖过剩、生存斗争和适者生存。现代达尔文主义重申了达尔文自然选择学说在生物进化论中的主导地位，运用摩尔根的基因学说，并结合群体遗传学、突变理论和物种隔离理论，解释了达尔文进化论中的一些难点。

由进化论可知，人类是进化而来的，人类所创造的文化和生存的社会也是按照一定的规律进化发展而来。要研究古代人类社会及其规律，就必须具有进化的观点。参照生物进化存在不同的发展阶段和动物种群的变异现象原理，就可以对古代人类遗存作时空的划分，以及对不同遗存间的联系进行探讨。运用文化进化的观点，可以对遗物进行分析。

进化论最直接的影响就是类型学的思想，李科威指出了进化论与类型学的同构性，与物种的变异性和承续性相似，古代遗物也存在继承和变化。进化论认为世界的进化过程是逐渐的、连续的，类型学也认为古代文化体是不断发展的，文化的演进方式近似于物种进化的概念。进化论认为生物之间都有一定的亲缘关系，遗

---

① [德]恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1955年版，第9—12页。

② 邹琼：《百年进化论与考古学》，《广西右江民族师专学报》第17卷第4期。

③ [英]格林·丹尼尔著、黄其煦译：《考古学一百五十年》，文物出版社1987年版，第53页。

存同样都是物化的人类行为的保留，可以通过谱系方式连接起来。生物的进化机制是自然选择，古代社会的发展机制正是考古学探索的目标[①]。例如，通过一组特定的器物组合如石器、陶器、骨器、青铜器，可以推测特定的人类群体物质文化的变化，进而推测当时的进化水平。当然，受自然环境、社会环境的影响，器物组合代表着人类物质文化不同的时空阶段。进而扩之，利用各地区文化发展不同阶段的文化遗存，可建构起人类社会的发展序列。

人类的历史并非是一个稳定的渐变过程，它还存在着各种各样的文化变迁，人类遗存上的突变，即为其具体体现，这是古典进化论所无法解决的；而新进化论更加关注遗存的经济、文化、意识形态和其他方面的研究，例如发明与发现、采借、文化融合、政治形态、无意识的偶然事件等都为潜在的进化选择提供了文化的变量，这些变量在选择过程中取决于其适应问题及其情境的能力，这就是怀特、斯图尔德极力倡导的新进化理论。借助于新进化论及其方法，就可以考虑探讨社会文化进化的通则，使考古学在探索人类文化进化发展的普遍规律的目标上迈进了一大步。

三、系统论

从科学的发展看，系统论同信息论、控制论息息相关，三论归一，互有交叉。这里重点介绍系统论。

系统论（General System Theory，钱学森创造了英文单词 Systematics）是由美籍奥地利生物学家贝塔朗菲（L. V. Bertalanffy）创立的。系统论提出的系统观点和系统方法，被实践证明是科学的世界观和方法论，显示出强大的生命力和普遍适应性，指导着科学的进步和发展。

万物皆成系统，无论事物的大小、形态、性质，都以系统的方式存在。世界可以划分为无数个系统，系统无处不在、无物不包。任何一个对象，都可以作为一个系统而加以讨论和研究，找出其内在的必然联系，揭示一般规律，从而达到认识世界和改造世界的目的。

系统论认为，任何一个系统由众多的要素构成，并按一定的秩序组织起来（各要素在时间和空间上的排列或组合构成系统的结构）。而系统本身又是上一层次

① 李科威：《考古类型学的进化观与文化动力学问题》，《东南文化》1992 年第 2 期。

系统的子系统或组成要素，系统内部的要素又可以作为子系统进行再一次分化。简而言之，系统是各要素之间相互作用、联系的矛盾体。

系统的各要素之间相互作用、相互联系，任意一个要素的变化都会引起其他因素发生相应的变化，这就是系统的相关性。系统总是在与其环境的相互作用中而存在，系统与外部环境之间存在物质、能量和信息的输入与输出的转换关系。随着环境条件的变化，系统相应地调整其程序、结构、内容和方式，不断地促进系统的变革。系统受环境的影响和制约，适应环境；又保持独立性，能动地作用于环境，改造着环境。

系统的相关性指系统与系统、系统与子系统及其要素（单元）之间的普遍联系，它揭示了联系和发展之间的内在联系：一切事物、现象和过程一旦进入到某一特定的系统联系中，就构成它的真正发展。发展正是系统内部及其与环境的相互联系、相互作用的展现。系统从整体、层次、协同、动态上揭示客观事物的本质联系和发展规律，为它们提供了科学说明的前景。

就人类社会而言，它是一个开放的、巨大的复杂系统，涉及政治、经济、科技、文化以及意识形态等各个领域。随着时间的推移，它将不断演化，而这种演化的集中体现就是人类文明的变迁。因此，考察人类文明的变迁历史将有助于我们正确理解和把握人类社会系统演化的基本规律，并探明促进人类文明不断进步的根本途径。

人类社会系统与外界环境存在永不停息的相互作用，并在这种互动中改变着自身，也改变着环境，从而使系统始终处于一种不断进化的过程中。人类所创造的每一种文化也都是一个动态的有机体，各种文化吐故纳新、文化互动而形成不同的文化群落、文化群、文化链，具有自身价值的每一文化群落都是人类文化整体的有机组成部分。

系统论的观点在新考古学中就已经得到重视，路易斯·宾福德在《作为人类学的考古学》一文中指出：必须把考古材料放到一个系统的参照系中去考虑，对考古学文化之间的相同点和不同点的研究必须运用文化系统结构、功能的知识，以分析考古学文化共同体的进化。宾福德认为考古学家用来描述事实的方法必须由寻求互不相干的特征的组合或结构转变为探索功能上互相依赖的系统①。

① ［美］路易斯·宾福德：《作为人类学的考古学》，《当代国外考古学理论与方法》，三秦出版社 1991 年版，第 45 页。

系统是一个有机的整体，整体性是系统最基本的特性。在一个考古学文化中，不仅有人类，还包含着与人类生存有关的地形、土壤、森林、山脉、河流、矿藏、空气、阳光、气候、动植物等因素。所以，科技考古工作者必须具有整体的观念，在工作时尽量少遗漏可能有用的信息。

考古学文化间的联系是系统间的交流，文化系统直接或间接地通过某种方式与其他文化系统联系。科技考古工作者要分析每个考古学文化系统中的子系统、不同子系统间的交流结果及其作用，检验各要素的重新组合是否导致系统的整体优化或劣化。这就需要借助于定性、定量分析，对各系统进行界定。

系统论中，事物的系统性、整体性、有序性、最优化都有规律可循，探寻这一客观规律，也是科技考古的重要研究内容。

第二节 基本方法

科技考古学是考古学的一个分支，自然要遵循考古学的基本理论和方法。事实上，科技考古学涉及的现代科技方法，是考古学方法的深化，它在实际应用中将接受考古学理论的检验。

17 世纪后期，地质学家认识到最早的地层首先形成，最后堆积的是最晚的地层，这就是斯坦诺定律(Stero's Law)。两个世纪后该定律被移植到考古学中，形成了考古学的层位学。考古层位学理论是文化层依次叠压，逐渐形成，时间有序，文化发展①。考古层位学最初用于考古学中是以深度计层来划分层位的，后来人们认识到用深度来划分不能揭示堆积间的纵横关系，晚期的堆积可以直接叠压或打破早期的堆积，考古学层位堆积并不完全像地层堆积那样水平。在我国，针对古代遗存错综复杂的堆积关系，从 20 世纪 30 年代开始，田野考古逐步推行了按土质、土色划分层位的方法。

科技考古工作者在遗物的收集过程中要遵照层位学原理，坚持由上及下、由晚及早地收集和选取遗物和样品，同时注明详细出处。倘若在操作中发现早期文化层中可能混人的晚期遗物，一般不予采集。用科学手段测定的绝对年代，最后仍要

---

① 俞伟超、张爱冰：《考古学新理解论纲》，《中国社会科学》1992 年第 6 期。

经层位学的检验。

近代科学产生之后，人们开始有意识地对周围的事物进行分类，并将分类法用于探索事物的规律性。物种分类学在19世纪中叶已开始建立，当然最初的原理非常简单。实际上，在19世纪上半叶，丹麦的汤姆森布置博物馆的藏品时，即已开始进行分类，他采用韦代尔·西蒙斯首倡的三期说①，将武器和工具按制作材料分为三组，代表三个时代。1836年，他在《北欧古物知识手册》中明确表述的这一思想，如同"第一束清晰的光束……透过了北欧和整个世界史前学的黑暗"②。19世纪晚期，类型学已被公认为一种新的研究方法，瑞典人蒙德留斯(O. Montelius)于1903年出版了《东方和欧洲的古代文化诸时期》，其中一章专门阐述了他所总结的类型学原理及若干实例。20世纪30年代，考古类型学被介绍到我国，迄今已发展成为成熟的区分类型学。类型学指出，过去的种种遗存都反映着当时人的生存需求、制作技术、使用心理、审美情趣等，这些因素的发展有一定的传承性和规律性。人类制造的各种器物、生活所需的各种建筑都有一定的演化轨迹。类型学最初主要用于排比各种物品，如武器、工具、容器、钱币、装饰品，尤其是陶瓷器、青铜器。现在还可用于排比其他器物，如壁画、书画、雕塑、建筑物和墓葬等。凡是有形体的东西，都可用类型学进行研究，即"聚类而比，求同寻异"③。器物按不同的用途、功能、制作工艺，可分为不同的类，视同一类器物的不同演变轨迹区分为不同的"型"，每一型器物演化过程的不同阶段分为不同的式。从一个大的空间、时间考察又可以进行分区(某一特定区域)、分系(某一特定谱系)的研究。类型学的一个重要而关键的工作是挑选典型器物，典型器物必须具备大量使用、变化速度较快而变化幅度又较大的特点。

科技考古中，类型学的应用更加灵活。在挑选用于断代和分析对象的标本时，务必要选择最具时代特征、信息最为全面的典型器物，这当然是在考古学典型器物之中进行挑选的，但同时在作少量损伤分析时，要挑选那些有隐蔽特征的器物。

---

① 1813年，韦代尔·西蒙斯在他的《概论我国历史上最古老最强大的时期》中写道："斯堪的那维亚最早的居民使用的武器和工具起初是石质和木质的，这些人后来学会了使用铜……然后才会使用铁。这样看来，他们的文明可分成石器、铜器、铁器三个时代。"

② [英]格林·丹尼尔著、黄其煦译：《考古学一百五十年》，文物出版社1987年版。

③ 俞伟超、张爱冰：《考古学新理解论纲》，《中国社会科学》1992年第6期。

科技考古学作为一门学科，其最主要特点就是用现代科技手段进行考古研究。这些科技手段来自于自然科学的各个领域，如物理学、化学、地质学、地理学、生物学、环境学等学科。

由于科技考古学的研究过程基本是通过仪器测定和分析来完成，其研究方法涉及自然科学的许多学科，因此所使用的科学仪器实际上不可能成为科技考古学的专用仪器，而只能是借用其他学科的研究方法和设备，或对其设备稍作改造或改进，只要能达到分析的目的即可，而且其分析结果往往被其他相关学科的研究所共享。至少目前是这样的情况。

科技考古学的研究依赖于现代科学技术，因而也受到科学技术方法或手段的制约。特别是许多高精度的仪器，若操作不慎，将造成一定的结果偏离，甚至得出截然相反的结论。不仅如此，许多实验设备本身容许误差的存在，加上样品的选择带有主观性，因此最后的结论须接受严格的验证才能成立。

科技考古学涵盖的内容庞杂，在不同的研究阶段使用不同的科技手段。在考古探测和调查阶段，拟采用遥感技术、地球物理方法、地球化学方法、声呐技术等，以在较大的区域内寻找地面、地下、水下考古遗存，或者对已知遗址进行高分辨率的无损探测，进而确定古代遗存的分布范围、几何形状、平面布局和结构。在调查过程中，也使用 GPS 与 GIS 技术。发掘工作中，可以利用计算机进行模拟发掘方案的设计，同时使用各种摄影手段进行记录，应用化学方法保护文物。进入室内整理阶段，可以用物理、化学、地质等学科的断代技术确定考古遗存的年代。对文物的形态分析、物质元素和结构的分析，多采用物理、化学分析技术对古代遗物的化学成分和物理结构进行非破坏性或几近无损的测定，对其中的常量、微量或痕量元素进行分析，以确定古代遗物的产地、制作工艺、烧结温度等，为探讨不同的考古学文化及其文化传播、交流提供重要信息。

科技手段虽然很多，但各有专长，每一种特定的科技手段只能解决考古学研究的某一方面问题，而且大多数是无法相互代替的。所以，在实践中要多种技术互相补充和检验。

第五章
科技考古学与其他学科的关系

科技考古学是利用科技手段进行考古学研究，它与自然科学和社会科学的许多学科有着广泛的联系。

第一节 科技考古学是考古学的一个重要分支

关于考古学分支学科的划分，"按照研究的年代范围、具体对象、所用手段和方法等的不同，考古学可以划分为史前考古学、历史考古学、田野考古学及各种特殊考古学等分支"①。而分支学科是某一学科内部的分裂，或表现为原学科某研究领域的专门化，或使某些研究手段特殊化，但均未形成一个学科应有的完整体系，因而只能隶属于原来的学科②。科技考古学正是考古学在发展过程中，由于研究手段的特殊化而出现的一个分支学科。

在关于考古学分支学科的讨论中，一些学者认为目前已提出的不少分支学科实际上是不能成立的，它们应该归属于考古学或其他相关学科。如认为美术考古、宗教考古、农业考古等，可归到美术史、宗教史、农业史等学科中，而科技考古学是运用科技手段来进行考古研究，应归到考古学中而不应成为一个分支学科。

---

① 夏鼐、王仲殊：《考古学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社1986年版，第16页。

② 参见知原：《面向大地的求索——20世纪的中国考古学》，文物出版社1999年版，第256页。

我们认为，科技考古学事实上已是考古学的一个分支。让我们来作个比较，众所周知，田野考古学是通过调查发掘获取考古资料的，在其操作过程中遵循层位学和类型学原理。田野考古学是考古学的一个分支已得到公认。科技考古学则是以现代科学技术对古代遗存进行调查、分析、研究，它在发展考古学的同时接受了考古学的检验。作为考古学的一个分支，科技考古学的研究对象、性质与考古学一致。

考古学在其自身发展过程中，研究内容愈来愈多，学者关注的不仅是器物，还包括古代器物的背景，更加重视其所反射的古人的生活、思想等；而且考古材料释放的信息多种多样，仅靠考古学的理论和方法不能全面揭示其蕴涵，而要借助于其他学科的方法。科技考古学则更客观、更全面、更深层次地诠释考古资料，它具有考古学的许多特征，并且继承了考古学的许多成果。

此外，科技考古学又与考古学有所区别，两者的研究方法、研究目的、研究对象的侧重点有所不同。科技考古学除具备考古学的知识外，还应具有环境科学、人类学、物理学、化学、计算机等学科的相关内容。

科技考古学无疑扩大了考古资料识读的含量，开辟了考古学新的研究领域。但它附属于考古学，仍遵循考古学的理论和方法，尤其在某些领域更要依靠考古学。例如，^{14}C 可测定遗存的绝对年代，但其误差也很大，有时甚至出现与层位关系相颠倒的年代判断，如江苏海安青墩遗址的年代断定就出现过这种情况①。再如，运用考古类型学我们可将殷墟文化分为四期，每期代表 70 年，而科技测年就无法进行这样的详细划分。

有些人因科技考古学尚未有自己独特的方法体系而对科技考古学能否成为一个学科提出质疑。应当看到，地质学的地层学、古生物学的形态学与考古特点相结合产生了考古层位学和考古类型学，进而世界各国逐步发展了自己的独特体系，如我国根据土质、土色来寻找遗迹，利用区系类型来建立文化谱系框架；而科技考古学至今尚欠缺完整的方法体系。这大概是因为：科技考古学处于建立阶段，理论体系有待建构；各种科学技术设备昂贵，科学仪器不只是用于考古，这使得科技考古的研究往往经受曲折，而将科学仪器改造成专用于考古研究则需要时间和费用；科技考古学涵盖的范围较广，而各个层而的具体内容处于不断变化和进展之中，现在

① 张忠培主编：《中国考古学：实践・理论・方法》，中州古籍出版社 1994 年版，第 181 页。

还较难从中总结出普遍的通则。尽管如此,这方面的工作,一定是需要努力完成的。

第二节 科技考古学与科学技术史的关系

人类在生活生产中创造着科学技术,其产生已久,但对科学技术史的研究却是比较晚近的事。18 世纪中叶,世界上出现了最早的一批科技史研究专著。一个多世纪之后的今天,全世界至少已有几十所研究科学技术史的专业机构,出现了 100 种以上的各种科学技术史学术刊物,国际科学史、技术史学术交流会也经常召开,出版了许多专门著作,代表性的有:英国科学家贝尔纳的《历史上的科学》、美国学术联合会主编的《科学家传记辞典》、美国库奥的《科学革命的结构》、英国科学家李约瑟撰写的《中国科学技术史》等。同时,各个国家和地区的高等院校也开设有科学技术通史课或专业课。20 世纪上半叶之前的科技史研究分科学史和技术史两部分,后半叶随着科学技术的相互渗透、整体化趋势的加强,科学技术史、科学技术学产生了。

科学技术史是研究科学技术的发生、发展及不同历史时期中科学技术与社会的相互关系,进一步寻求科学技术内在规律及其发展动力的科学。而科技考古学则用科学技术理论和方法来研究考古遗存,透过"物"来探讨"人"的行为活动。两者的概念截然不同,研究内容也有明显的区别。科技考古学的研究对象是古代遗迹和遗物(包括出土和传世的);科学技术史的研究对象则包括各门科学技术的综合史、分科史(或专门史)、国别科技史、断代科技史(某一历史时期的科技史)、科学技术思想史、科学家和发明家及技术工程人员的传记研究等。

尽管科学技术史和科技考古学差异明显,但两者仍有密切联系,科技考古学中的古代科学技术可以作为科学技术史的研究对象。有些人因此认为科技考古学应归属于科技史。其实不然,科学技术史的研究旨在揭示科学技术发展的内在规律、发展动力和发展逻辑,而科技考古学侧重于研究古代科学技术与古代人类的关系,一切都为复原古代人类的思想、生活、文化、经济等服务。还有,科学技术史通过对科学技术发展历程的研究为当代科学技术的发展提供理论指导,重视现代和未来。科技考古学的现实意义没有那么直接。一件青铜器,冶金史的学者研究的是其技术,而考古学家则通过它的技术分析来折射当时人们的信仰习俗、文化传统、经济

发展水平、不同地区间文化的交流传播等。在某些条件下，科学技术史研究的许多方面“是要依靠考古学提供实物标本和涉及标本的有关资料（例如标本的年代和出土情况等）”①，如果没有考古实物资料中的科学技术部分，科学技术史的研究将失之全面。与此同时，科技考古学的发展在一定程度上需借鉴科学技术史的研究成果，以深化科技考古学的研究层次，拓宽其研究内容。

第三节 科技考古学与相关自然科学学科的关系

科技考古学与物理、化学、地质、生物、人类学、环境科学、数学等学科密不可分，凭借这些学科的方法，科技考古学方得以存在和发展；反过来，科技考古学也丰富着这些学科的内容。

人类学一般被分为体质人类学（Physical Anthropology）与文化人类学（Cultural Anthropology）或称社会文化人类学（Sociocultureal Anthropology）。欧美国家又将文化人类学分为考古学、民族学、语言学，我国则将考古学划归于历史科学。以科技考古学与体质人类学之间的关系为例：体质人类学视人类为生物有机体，研究人类体质的群体差异以及历史变迁②，运用体质人类学的成果，科技考古工作者对出土的人骨进行观察、测量、鉴定，可以认识其所属的人种类型、性别、人骨的病理和食性特征，进而探讨古代人种类型的分布与流动、古代的丧葬习俗、社会组织形态与生态环境的关系。如通过对中国山东等省和日本的拔牙习俗、牙齿形态学的分析比较，发现相同的习俗与相近的沿海环境等有关，但两者缺乏明显的系统源流关系③。科技考古学从考古遗存中提取 DNA 等遗传因子信息，并从中获取古代人种的进化程度和差异，进而丰富了体质人类学家对人类及人种起源、进化的研究；而现代人类的 DNA 等遗传因子的分析也有助于古代人类的研究。

环境科学是一门综合性很强的学科，所谓环境是指围绕着人群的空间及其中可以直接、间接影响人类生活和发展的各种自然因素的总体。环境科学的任务是探索全球范围内环境演化的规律，揭示人类活动同自然生态之间的关系，探索环境

① 夏鼐：《中国考古学和中国科技史》，《考古》1984 年第 5 期。

② 周大鸣、乔晓勤：《现代人类学》，重庆出版社 1990 年版，第 16 页。

③ 韩康信等：《中国和日本古代拔牙仪式的比较研究》，《考古学报》1998 年第 3 期。

变化对人类生存的影响,研究区域环境污染综合防治的技术措施和管理措施①。可见,环境科学侧重于对社会经济发展和环境保护协调发展的研究;而科技考古学的环境研究,则主要探索古代人类与生态环境的关系,即古代的生存环境提供给了古人什么样的条件,又怎样制约着古人的发展,而古代人类又是如何适应并改造利用其生存环境的。人与环境诸要素形成了一个多元结构的生态系统,科技考古工作者通过对山顶洞人的种种遗物分析,得知当时山顶洞人的周围环境:"林木葱葱,草采茫茫,野马、野牛、野猪、野兔、羚羊、斑鹿、赤鹿、狐狸、狼、貉、洞熊、虎、豹、鬣狗、鸵鸟等,仍然活动在周围的山冈、平原上,附近的河流水塘中还有草鱼、鲩鱼、河蚌。"②而环境科学者则要研究该地区古今环境变迁的原因、规律,以及如何治理环境等。总结人类的生产、消费系统中物质和能量的迁移及其异常复杂的转化过程,如何保持输人和输出的相对平衡是环境科学研究的重点;科技考古学则着重研究古代的气候、地质、地貌、动植物等自然因素,认识自然环境与人类的互动关系。纵然环境科学与科技考古学有很大差异,但两者不无联系。科技考古学为环境科学积累了许多资料,提出区域先民的适应模式及其影响、区域环境的变化特点等;环境科学揭示出特定区域环境演化的规律及对生存于其中的人类的影响趋势,从而帮助科技考古学研究某一考古学文化中人与自然的关系。

思考题

1. 怎样理解科技考古学是考古学的一个重要分支?
2. 试述科技考古学的定义。
3. 发展期的科技考古学有哪几方面的特点?
4. 简述科技考古学的研究对象。
5. 科技考古学研究的作用主要体现在哪几个方面?
6. 简要回答科技考古学的研究方法。
7. 试述科技考古学与科学技术史的关系。

---

① 吴学周等:《中国大百科全书·环境科学》,中国大百科全书出版社1983年版。

② 杜金鹏:《幽燕秘史——京都探古记趣》,四川教育出版社1996年版,第24页。

上篇

考古探查、发掘与遗迹遗物的采集、保存



第六章
考古勘探

考古勘探是考古工作的基础，是田野考古工作的重要组成部分。它与考古调查、考古发掘构成获取资料的三大手段。考古勘探与考古调查通常紧密相关，有时不分先后，共同协作。通过勘探，研究人员了解遗址的分布结构，决定是对该处进行发掘、保护还是放弃，勘探工作成为考古工作的前奏曲。

利用现代科技手段进行考古探测，具有传统考古勘探（手工铲探）不可比拟的优越性。首先，科技考古勘探的工作过程通常不直接接触遗迹、遗物，因此不会对文物造成破坏，即便有损坏也是微不足道的。其次，科技考古勘探的工作周期短，劳动强度小，所需资金少，准确率高。如1987年华东师范大学地理系与镇江市博物馆运用遥感技术对镇江地区的商周时期台形遗址与土墩墓进行探测，在较短时间内，发现台形遗址185处，可判率达90%，判对率达100%；土墩墓3 134座，可判率90%，判对率95%。工作效率较过去40年来的人工调查有巨大突破。①

此外，科技考古探测可以克服许多自然因素的制约，解决传统考古工作的困难，如在条件恶劣、人迹罕至的地方进行考古调查，人工调查不能够顺利进行，但采用遥感考古则能够达到考古调查的目的。同时，由于科技考古探测的探测范围广，仪器精密度高，能够把许多杂乱无章甚至人们不易想到的东西概括成一个有机的整体，弥补了许多空白，便于我们掌握遗存的准确性、完整性。利用现代科技，可以从海、陆、空的广大空间去进行多种方法的探测。

① 朱俊英：《考古勘探》，科学出版社1996年版，第8页。

科技考古探测除了发现古代遗存外，更重要的是可以记录、考察和解释古代遗存的历史变化，对于一些重大问题的解决和专题研究帮助极大。诸如古代城址的布局与结构、遗址的范围与堆积程度、墓地的全貌及墓葬的分布等，若以传统考古手段，如果不是全部发掘则情况不能够明了，而利用科技考古探测则可以使这些问题得到较好的解决。

根据现有的探测手段，考古勘探可分为航空航天遥感探测（又称遥感考古）、地球物理探测（简称物探）、传统铲探和水下声呐探测。以目前的应用情况看，这几种勘探手段各具优势和不足，因而在实际运用中常常几种方法一起使用，互相纠正和弥补。如通过遥感考古获得了遗址、遗迹的大致轮廓，结合物探或者手工铲探来寻求其更详细、更具体的定位。

与传统的勘探程序一样，科技考古学的勘探亦分为三大步：第一步是资料的搜集和分析，在此基础上制定野外勘察计划，并做好野外勘察前的各种准备。第二步是野外调查和实地考察，发现、记录新的遗迹、遗物现象。第三步是对调查资料的整理、分析，结合获取的各类信息和其他资料，总结调查区域的遗存概况。科技手段勘探一般和传统的地面勘探相结合，二者相互补充，且前者可被后者所检验。

第一节　遥感与航空摄影

一、遥感与遥感考古的概念

（一）什么是遥感

遥感是随现代摄影技术、空间技术与光电技术的发展面产生的一门综合性探测技术。它源于摄影测量，航空摄影学的发展为遥感技术提供了空间定位的理论基础和方法。1839 年，世界上第一张光学照片在法国科学院大厅展出，由此引出了摄影测量和遥感科学。1962 年，在美国召开的第一次国际环境遥感讨论会上，“遥感”一词被正式使用。随电子计算机和传感器的日渐改进，遥感范围在不断扩大。

遥感（Remote Sensing），意即遥远感知，是一种远距离的、不直接接触物体而取得其信息的探测技术。具体而言，就是在远离地球目标的空中以至太空高度，用电

子光和光学探测仪器对地面进行观察，拍摄各种形式的图像和照片，然后将这些资料用摄像或数字的形式传输到地球上，供各行各业的科学家分析、判读，以提高对各种自然现象的认识和理解，加速科学的发展和对自然的改造①。目前，遥感技术以其高速、不受地面条件限制、考察范围大、遥感电磁波段多等优点被普遍应用于世界各国的地质、测绘、农林、水利等行业，并取得显著的经济效益。

遥感系统包括三部分。一是用来感知的遥感仪器，又称传感器。传感器一般由收集器、探测器、信号处理器和记录输出设备组成。常用的传感器有航空摄影仪（包括普通照相机）、多光谱扫描仪、微波扫描仪、雷达扫描仪。二是输送遥感传感器的运载工具——各种平台。运载工具可以从几十米到几千米，接近地面（20米左右）的平台有伸臂汽车（遥感汽车）、遥感高塔（梯），主要是对高空起辅助和校准作用。航空平台有气球、直升机、各种航空飞机（小型、中型、超高空型），航天平台有人造地球卫星、探测火箭、航天飞机、宇宙飞船。三是传送、识辨、处理信息的设备，包括接收系统、记录系统、处理的设备、计算机自动识别和人眼的判读。

根据运载工具和遥感距离的不同，可以分为航天遥感（以火箭、卫星、宇宙飞船、航天飞机等为运载工作）、航空遥感（以气球、飞机作为运载工具）、地面遥感（以车、船为运载工具）。

根据物理场源的不同，可以分为主动遥感和被动遥感。前者是通过人为地向地物发射电磁波，然后接收从地物反射回来的电磁波，进而识别出地物的属性和特征，如侧视雷达、激光荧光。后者是借助于传感器被动地接收地物的反射、发射电磁波的信息，从而分辨出地物的信息特征，如摄影、红外扫描。

（二）遥感与航空摄影考古

欧美国家在20世纪70年代遥感技术应用不久就开始了遥感考古的探索，甚至研究出遥感的环境模型。80年代，遥感考古已广泛使用。到目前为止，欧美许多科研团体和个人已探索出许多行之有效的模型、方法。随着遥感与航空摄影考古的发展，在已有的航空像片基础上进行分析研究已越来越多，当然专门的航空摄影考古飞行勘察仍然必要、常见。

遥感考古就是将遥感技术用于考古研究中，即运用遥感技术，获取遗迹或现象

① 朱来东：《遥感技术与农业考古》，《农业考古》1986年第2期。

的电磁波或超声波信息，并运用光学或计算机图形图像处理技术，对这些信息进行滤波、分类、边缘增强、反差变换、特征提取或假彩色合成等处理，再根据影像的色调、纹理、图案及其时空分布规律进行分类、识别和解译，确定遗迹或现象的位置、分布、构成与形状诸方面特征，还能进行文化资源追踪、考古测量、古地形地貌与古城址复原等工作①。

实际上，最初的遥感考古只是航空考古(Aerial Archaeology)。航空摄影考古是采用多种形式在不同时间、从不同角度在空中对地面进行摄影，利用地貌形态、地物阴影、霜雪、植被及土壤湿度等多种因素在遗址地区形成的不同标志，解释地面或地下遗迹的特征。

航空摄影考古在英国等欧洲国家开展较早，已有近一个世纪的时间。1858年，纳达尔(Nadar)用气球装载照相机第一次成功地获得了巴黎鸟瞰图。与此同时，摄影测量学的创始人——法国陆军上校劳赛达特(Laussedat)首创了适合于摄影测量用的摄影仪器和交汇摄影测量法。20世纪初，航空摄影开始用于考古学，如从热气球上拍摄了罗马城镇Ostia。1906年，英国中尉沙谱(Sharp)在军用气球上从倾斜和垂直角度拍摄了斯通亨奇环状列石(Stone - henge)②，并于次年刊登在《考古学》杂志上，引起轰动；它显示了从空中摄影这个新角度可对考古遗存进行整体的考察和寻找地面无法看到的遗迹。1909年怀特兄弟第一次用飞机在意大利拍摄了航空照片。两次世界大战期间，空中摄影是搜集情报的一种有效的工具，出于军事的需要拍摄了大量的航空照片③，扩大了考古遗存的调查，尤其提供了许多不为人知的考古遗址照片。德国、英国、法国的考古工作者承认空中摄影对考古研究的价值，他们认识到利用土壤、阴影和庄稼所显示的特点可寻找考古遗存。两次世界大战期间空中考古学摄影的成就应归功于克劳福德(O. G. S. Crawford)和普瓦德巴尔(A. Poidebard)神父，他们发现从飞机和气球上拍摄的照片可以表现史前建筑的平面景观。克劳福德将自己在潮湿季节拍摄的300张考古遗址的照片汇总于《空中拍摄的韦塞克斯》(*Wessex from the Air*)一书中，他还在一次演讲中阐述

① 刘建国:《遥感考古的原理与方法》,《考古》1994年第4期。

② Wilson D R. Air Photo Interpretation for Archaeologists. St. Martin's Press, Inc. New York. 1982, 10.

③ Michael B S. Advances in Archaeological Method and Theory. Academic Press, Inc. Ltd, London. 1984, 7:300 - 301.

了空中考古学的原理,并发表了《考古学家的空中摄影术》;他是第一个指出倾斜角度拍摄对空中摄影的作用的人,使得人们对空中照片有了新的认识。几乎与此同时,普瓦德巴尔神父通过数次飞行实践总结出与克劳德福相同的理论,他的研究重点在近东,在推罗他以最标准、最有实效的方式把地面考古和空中考古结合起来,还采用了特殊的水下考古方法[1]。之后,意大利考古学家波尼(G. Boni)主持的罗马古城广场上的发掘现场首先用空中摄影辅助地面工作。20 世纪 30 年代,Erich Schmidt 在伊朗拍摄的照片记录了其发掘进程和拟发掘的遗址,他还对那些无图地区进行了航空勘查。1927 年,军用飞机从瑞士的 Neuchâtel 湖面上拍摄到青铜时代晚期的橡木干栏建筑。1929 年,Alfred Kidder 和 Charles Lindbergh 飞越了墨西哥尤卡坦半岛的中部和东部,在一片人迹罕至的热带雨林地区发现了六处新的遗址;为了寻找古代村落,他们还飞越了亚利桑那州和新墨西哥州。两次世界大战期间,出于军事的目的,军方拍摄了许多照片,这些战争的副产品采用完整覆盖的方法,竟然成为遥感考古不可多得的资料。第二次世界大战后,随着摄影机和飞机的改进,航空考古摄影多采用立体镜观察大面积范围中完整的垂直覆盖区域。新技术的进展也促进航空摄影的发展,计算机的图形处理技术可以提高图片的清晰度和对比度,无论是倾斜的、还是垂直的航片通过计算机均可进行转化。

20 世纪 70 年代初期,美国率先在本土进行了宇航遥感技术的试验。之后,航空遥感考古进一步发展。由于技术和经费等缘故,航天遥感技术在考古工作中运用有限,航空摄影仍是诸种“遥感”手段中在考古学研究中运用最多的方法之一。高空遥感最有成效的当属美国国家航空航天局在中美洲的工作,他们利用 LANDSAT 卫星图像的负片(与本色截然相反),于 1983 年在墨西哥尤卡坦半岛上发现了范围广大的玛雅时期的农田和聚落体系,这次工作精确地确定了 112 个遗址,发现了两座有金字塔的城市[2]。卫星感应器的最新发展大大提高了析像清晰度,法国 SPOT 卫星带有的全色感应器,析像清晰度可达 10 米,分辨率较高。

我国 20 世纪 80 年代以来也多次尝试遥感考古,一般采用航片分析与地面勘探、物探相结合的形式,对陕西秦始皇陵保护区、陕西昭陵古墓葬、汉长安城、安阳

① [英]格林·丹尼尔著,黄其煦译:《考古学一百五十年》,文物出版社 1987 年版,第 294—298 页。

② [美]科林·伦福儒、保罗·巴恩著,中国社会科学院考古研究所译:《考古学:理论、方法与实践》,文物出版社 2004 年版,第 85 页。

殷墟、北京地区长城、镇江地区台形遗址和土墩墓、安徽寿春古城和南陵县、湖北长兴县、新疆库尔勒至轮台古代城址等遗存进行探测①，结果显示这种手段节约资金、省时省力、获取信息量大。1996 年 4 月，在中国历史博物馆成立了中国航空考古工作小组。同年 5 月，中国历史博物馆航空摄影考古工作组在洛阳地区开展航空摄影考古试验工作，对二里头、偃师商城、汉魏故城、隋唐东都城、邙山古墓群、龙门、巩县宋陵等遗址进行了航空摄影考古，工作区域约 1 000 平方公里，这是我国首次开展的大规模航空摄影考古实践，其结果表明我国埋藏于黄土地区的地下夯土基址和建筑遗迹在一定条件下能引起地表植被生长的变化，形成植被标志②。1997 年又进行了内蒙古东部地区古代大型遗址的飞行勘察，重点勘察了夏家店下层文化山城、辽上京、中京、庆州、祖州、祖陵、庆陵、金界壕边堡、元上都、应昌路故城等遗址，取得了圆满的成功。同年，在航空考古工作小组的基础上，配备大量的仪器设备，成立了“遥感与航空摄影考古中心”。2000 年 5 月在对北京老山汉墓发掘前和发掘中用遥感技术发现周围有三处异常，据专家推测应为汉墓群。2001 年，中国科学院、教育部、国家文物局合作成立了遥感考古联合实验室，为多学科协作攻关、优势互补、共同推进和提高学科发展水平创造了良好的条件。有些学者还对我国遥感进行了探索，将我国分为南、北两大区域并施以不同的方案③。

那么，遥感考古与其他勘探手段相比较，有哪些优势呢？第一，具有不损伤探物的特征，因而可将之称为无损伤考古（Non - Destructive Archaeology）。遥感考古本身不直接接触所探物体，故不存在对其造成破坏。第二，可以普查到工作地区的每一角落，它不受地区限制。它可以克服交通不便、条件恶劣、地形复杂、高寒缺氧等不利因素，还可到达人迹罕至之处，如高原、荒漠、大片森林草原、水网湖沼等。

---

① 宋德闻等：《秦始皇陵园的摄影测量与遥感工程》、《文物》1990 年第 7 期；宋德闻等：《昭陵古墓葬遗址遥感解译和定位的研究》，《文物》1992 年第 7 期；刘建国：《环境遥感在城址考古中的应用初探——汉长安城环境遥感考古的尝试》，《考古》1996 年第 7 期；刘建国：《安阳殷墟遥感考古研究》，《考古》1999 年第 7 期；中国社会科学院考古研究所考古科技实验研究中心、汉唐考古研究室：《新疆库尔勒至轮台间古代城址的遥感探查》，《考古》1997 年第 7 期；丁邦钧等：《遥感技术在寿春城遗址考古调查中的应用》，《科技考古论丛》，中国科学技术大学出版社 1991 年版；曾朝铭、顾巍：《北京地区长城航空遥感调查》，《文物》1987 年第 7 期。

② 宋宝泉、邵锡惠：《遥感考古学》，中州古籍出版社 2000 年版，第 23 页。

③ 宋宝泉等：《航空摄影考古在中国应用之探讨》，《“迎接二十一世纪的中国考古学”国际学术讨论会》，科学出版社 1998 年版。

遥感考古穿透力强，分辨率高达1米。穿过密密丛林它发现了树丛下的玛雅文明；透过沙层，它找到了撒哈拉沙漠里的古代河道和湖盆①。而我国地域广阔，自然形态多样，遗址数量多，内涵丰富，保存状况不一，开展遥感考古尤为必要。如新疆库尔勒至轮台古代域址的探测范围既有城乡居民点、耕地、河流，又有荒凉的沙漠，比较适合开展遥感考古。第三，遥感考古还可发现用物探、手探等方法寻找不到的遗迹，一些遗址具有特殊的季节性（如农作物成熟前后）、特定的时间性（如夜晚）、特殊的角度，这些就必须依靠遥感考古。第四，遥感考古的效率高，研究周期短，制图定点准确、精密度高，尤其多时相遥感资料的解译、定位速度之快往往是传统勘探的许多倍，而这些大多是在室内进行，可大大减少野外工作量和节约经费，如进行大范围的文物普查和考古专项调查，其效率远远高出传统的踏查法。最重要的是，遥感考古因远距离地鸟瞰地表而易于从整体上把握遗迹特点。古诗云"会当凌绝顶，一览众山小"，由于视野广阔，所有的地面信息尽收眼底，观察者易于把在地面上很难发现或杂乱无章的现象，概括出一个有规律的整体形象，特别适合用于大尺度范围和大型遗址的勘察，也用于研究遗址群的分布规律；当然，遥感考古对遗址及其周围环境大面积的调查，还可以避免大面积考古发掘对遗址的破坏，减少野外考古工作量。还有，航空照片在考古发掘和报告中比传统的地图更清楚、涵盖范围更大，更能反映环境文化特征。

二、遥感与航空摄影考古的物理基础

遥感与航空摄影考古所包含的理论和方法很多，主要包括地球物理勘探、测量、航空摄影勘察和卫片、航片分析等等。其中以航空摄影勘察，航片、卫片考古学分析为主，文献研究、考古调查发掘及地球物理勘探为辅。遥感考古的工作原理建立在遗迹或现象的物理属性、电磁波波谱特征、影像特征三者的特有关系之上。人类遗迹、遗物的形成与周围的环境有别，各自具有的电磁波辐射的情况也就不同，造成不同的电磁波波谱特征，各种地物的电磁波波谱在时空范围内形成一定的分布，反映在遥感影像上的不同色调及其组成的各种图案和时空变化的范围。

① 朱来东：《遥感技术与农业考古》，《农业考古》1986年第2期。

(一)电磁辐射理论

遥感的物理基础就是电磁波理论,即物体的电磁辐射。众所周知,地面上的所有物体都受到太阳的电磁辐射,而不同的地物具有不同的反射、发射、透射、吸收电磁波的能力。如果能获取到地物电磁辐射的特征,便可识别出该地物的属性和状况。

各种物质都是由各种不同的原子或由它所组成的分子构成。当原子或分子受到光和热等作用时,原子内部的原子核和电子的状态就发生变化,进而产生使原子发生振动的各种运动方式;物体的这种内部状态的变化就产生电磁波。根据麦克斯韦电磁理论,任何变化的电场都会在它的周围产生变化的磁场,而变化的磁场也将在它的周围感应出变化的电场。于是,电场和磁场相互激发,且以辐射的方式向外传播,这种电磁能量的波动就是电磁辐射,包括辐射、吸收、反射、透射等现象。电磁辐射具有波动性和粒子(量子)性;不同波长的电磁波,其波粒二相性不同,二者基本成反比(即波长愈短的电磁波粒子特性愈明显,波长愈长的电磁波粒子特性愈不明显,波动性则与之相反)。遥感技术就是利用了电磁波的波粒二相性来探测目标所发生的电磁辐射信息。

由于电磁波产生的方式不同,它的能量高低不同、波长(频率)不同。按波长的变化顺序排列,可组成一个电磁波谱。目前遥感技术所用的电磁波波段,是整个电磁波谱的一小部分,从紫外到微波波段(表6.1)。在遥感中,电磁波一般用波长表示。

表6.1 遥感所用的电磁波谱

波段名称		波长范围
紫外波段		0.01~0.38微米(1微米=1/1 000毫米)
可见光波段	紫色光	0.38~0.43微米
	蓝色光	0.43~0.47微米
	青色光	0.47~0.50微米
	绿色光	0.50~0.56微米
	黄色光	0.56~0.60微米
	橙色光	0.60~0.63微米
	红色光	0.63~0.76微米

续表

波段名称		波长范围
红外波段	近红外	0.76～3.0 微米
	中红外	3.0～6.0 微米
	远红外	6.0～15.0 微米
	超远红外	15.0～1 000 微米
微波波段	毫米波	1～10 毫米
	厘米波	1～10 厘米
	分米波	10～100 厘米

电磁波透过地球大气时，会受到大气的吸收和散射而衰减，其衰减强度因波长而异。电磁波的某些波段，大气对它们的透过率高，衰减作用小，这些电磁波波段称为大气窗口；而那些透过率低、衰减作用大的电磁波波段称为大气屏障。遥感技术就是研究和利用那些有利的大气窗口，以利于最大限度地接受有用信息。这些大气窗口主要分布在：可见光和近红外区（0.3～1.3 微米）、近红外波段中段（1.3～2.5 微米）、热红外波段（3～5 微米和 8～14 微米）、微波波段（0.8～25 厘米）。

（二）地物的波谱特征和物理特性

一方面，任何物体对外来电磁波均有反射、吸收、透射作用。另一方面，地物只要温度高于绝对零度，就会不断地向外发射电磁波（热辐射）。在整个过程中，入射电磁波与反射、吸收、透射电磁波之间，遵守能量守恒定律，用公式表示为

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

式中，α 为吸收率，即吸收电磁波能量与入射电磁波能量的比值；τ 为透射率，即透射电磁波能量与入射电磁波能量的比值；ρ 为反射率，即反射电磁波能量与入射电磁波能量之比。吸收率、反射率、透射率分别表示物体对外来电磁波吸收、反射和透射能力的大小。不同地物的这些能力不同，发射电磁波的能力也各不相同。另外，同一地物类型在不同波长处的反射、吸收和透射的能量比例也是不同的。地物这些电磁辐射的能量比例差别含有丰富的遥感信息，为识别影像上的地物类型和所处环境条件提供了可能，是遥感技术得以实现的依据。

目前遥感传感器所能利用的信息主要是地物反射、发射的电磁波信息。根据电磁波的平衡方程式可以推知，地物的反射率越高，它反射电磁波的能力就越强，在遥感图像上的色调就越浅；而地物的反射率越低，它反射电磁波的能力就越弱，在遥感图像上的色调就越深。任何地物都有发射、吸收红外线和微波的能力，在温度不变的条件下，地物吸收的波长与发射的波长一致；而地物发射红外线的强度与周围环境密切相关，地物的微波发射由其物性差别决定。在遥感技术中，地物的电磁波发射强度用发射系数和发射波谱曲线表示；地物由于其物质结构而具有各自特殊的发射波曲线特征，据此可以判别地物的性质。

（三）彩色原理

各种物体对发光体（如太阳、电灯等）的人射光线均有选择性的吸收和反射，形成了各种不同的颜色，即所谓的有光有色。但物体本身的颜色与观察者所看到的并不完全一样，后者称为色觉（即人们对不同色光所产生的彩色视觉）。而色觉是依靠眼睛视网膜内的视觉细胞和视觉神经感受的。人眼视网膜有感觉红、绿、蓝三种视觉细胞，当三种感色细胞受到刺激后，立即将信息通过视觉神经传递到大脑而得到色觉。当三种感色细胞受到同等程度的刺激时，产生消色感觉；刺激强烈、微弱时分别得到白色、黑色感觉，刺激中等时得到灰色感觉。当三种感色细胞同时分别受到不同程度的刺激时，就得到彩色感觉。所以，当三种感色细胞受到刺激时，就可得到各种颜色的感觉，这就是三原色视觉原理，红、绿、蓝三色被称为三原色。

在一定条件下，三原色可以进行分解和合成，形成各种各样的颜色，消色和彩色也可以互相转化。彩色摄影和图像就是利用了色觉原理，经过色光的分解和合成被人们所识别。

（四）考古遗存的物理特征和影像特征

考古遗迹作为一种地物，具有特殊的物理特性，显示出特殊的影像特点，形成独特的遗迹标志。

第一，遗迹、遗物与周围自然环境的电磁波波谱特征不同。考古遗迹和现象由于形成时间、环境等诸因素与周围环境有很大差异，通常与周围土壤或生土层之间的电阻率或磁化率成反比。古代遗迹是人类改造自然、征服自然的结果，它具有一定的规律，如土肥地美、靠近高山河流、交通便利、向阳背风等是选择“宝地”的条件，而且城址、居住遗址、墓葬的分布具有明显特点。这样，考古遗迹或现象之间的

辐射电磁波能量接近一致、电磁波波谱特征及其时间变化和空间分布极有规律，因而遗迹或现象与周围环境的电磁波波谱差异明显。

第二，考古遗迹的土壤特征是重要的信息显示，形成土壤标志（图6.1），可以分辨出古代的城墙、道路、墓葬、古河道等遗迹；城墙、道路处的遗迹会呈现出较浅的色调，而墓葬、古河道处的遗迹则色调较深。考古遗存的土壤有路土、夯土、填土、淤土等，与自然土壤的色泽、结构、温度、致密度存在差异。通常在耕土层中容易发现，尤其是耕土层被翻过之后，当该地区潮湿时土壤的颜色变化明显（这是因为不同的土壤有机物和矿物质含量不一样），易于区分，包括传统的考古钻探和发掘中都可分辨出。但是反复的耕作使表面物质混合一致，识别就比较困难，然而遥感影像仍可以进行一定程度的识别。如新疆北庭古城的黑白和彩红外航空影像上，浅色的线状土壤标志显露出城内的夯土基址、护城河、道路等遗迹，而夯土基址和道路是实地调查很难发现的①。

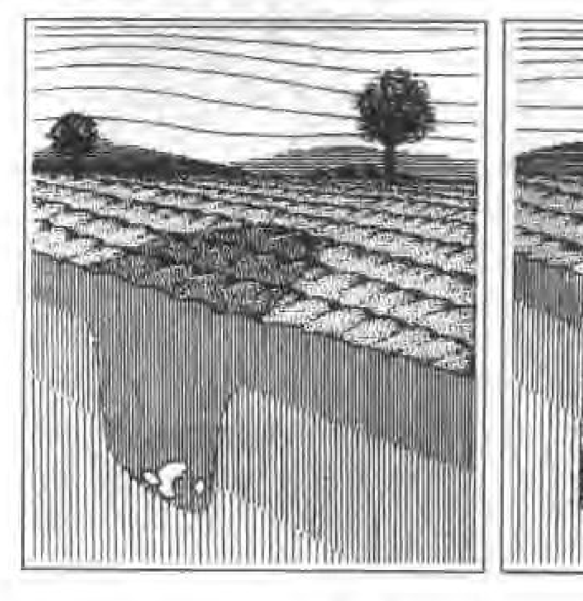
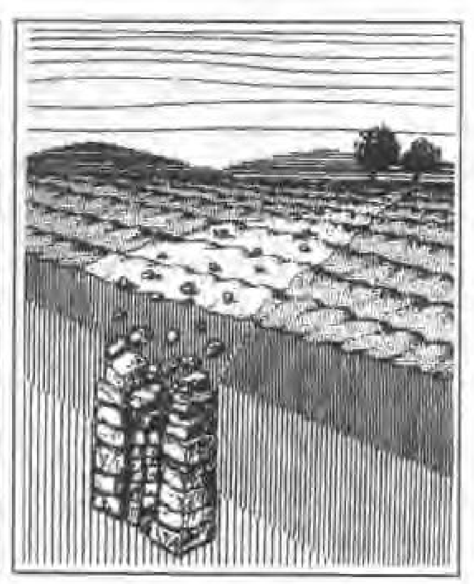
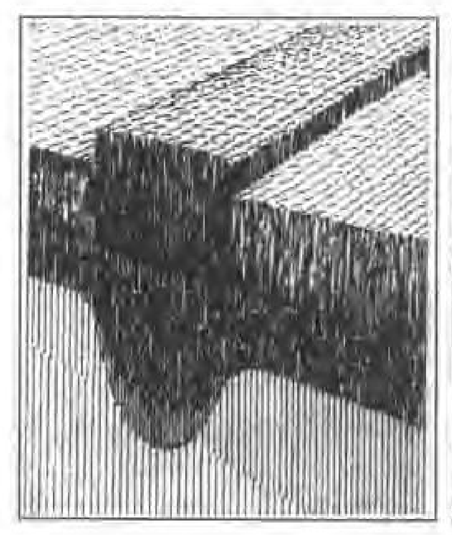



图6.1 土壤标志示意图

第三，考古遗存的物理特性会作用于遗迹所在地的植被生长（图6.2）。地下的考古遗迹通常会导致土壤的板结与疏松、肥沃与贫瘠、含水量多少（即其致密度

① 刘建国：《遥感考古的原理和方法》，《考古》1994年第4期。

与含水量的不同地热率)之差别,使得地上生长的树木、农作物、野草的生长与分布异常,成为遗迹的植被标志(或称"庄稼标记")。一般来讲,墓葬、填平的壕沟、渠道、灰坑等类遗迹因其质地疏松,含水量丰富、土质相对肥沃而使植被生长旺盛,成为正植被标志;古代道路、夯土、瓦砾、红烧土以及砖瓦类建筑因土壤板结、透水性差,植被生长较差,为负植被标志。就种类而言,草本植物的植被标志较明显,尤其是谷类农作物,如大麦、小麦、燕麦在成熟季节里与周围环境中的农作物差异更明显。



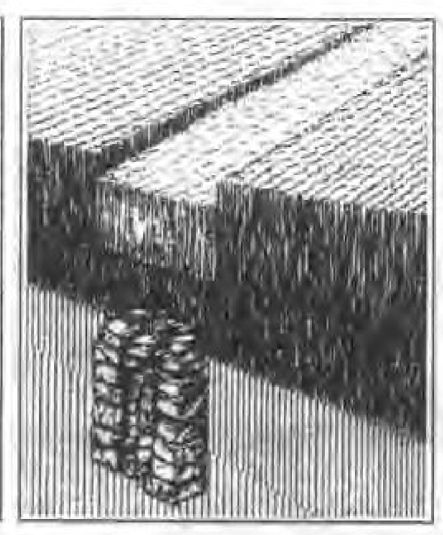


图 6.2 正植被标志和负植被标志图

第四,遗迹的阴影标志(图 6.3)。残存在地面上的遗迹如城墙、坟冢、土台、沟渠容易形成地面的起伏变化,总会呈现一定的微土貌特征。它们在倾斜太阳光线的照射下,表现出不同的明暗、大小以及组合方式的阴影,特别是布局具有规律性的城址特征尤为突出。在航空照片上,特别是黑白影像上阴影明显。拍摄时,要考虑太阳高度角和摄影时间的因素(上午和下午最佳),条件许可的话,可以在一天中的不同时间进行拍摄,以便比较不同方向的阴影,更好地对遗迹做出正确的判断。在城垣和建筑遗迹地面上尚有保存的遗迹,特别适合用阴影标志勘察。

第五,不同的考古遗迹在夜间都会发出与周围环境不同的特征红外光谱,在夜间卫片或航测红外光波段照片中可以分辨出来。

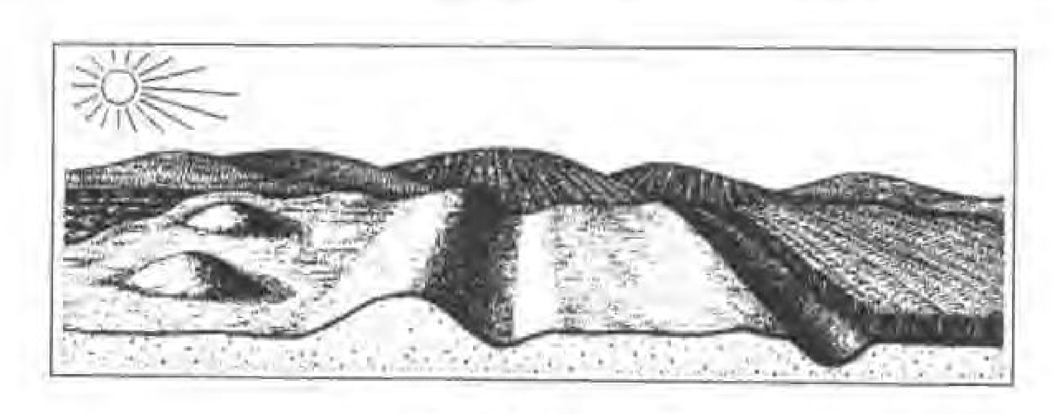


图 6.3 阴影标志示意图

三、遥感片的特性与判读

(一) 遥感图像的特性及标志

遥感片是辐射能在各种图像上的表现，必须对航片内容作分析、判读、解释，弄清图像中的轮廓、线条、色彩、花纹对应的地表物处于何种状态。遥感采用可见光、红外、微波等波段进行测量，其影像特征也有所不同。

航空遥感片分为黑白、彩色、红外像片，三种像片的识别方法大同小异。在识别之前，判读者应首先对该地区各类图像、各种比例尺的影像以及气候、土壤与包括农作物在内的植被生长季节等情况熟悉明了，做到心中有数。

1. 摄影像片的物理特性及其标志

摄影像片指航空平台所获得的可见光和彩红外的光学摄影像片，其物理特征主要取决于地物的光谱特征和摄影感光材料的光化学性质。摄影像片是所摄地区的中心投影，即地物的反射光线通过固定点(相机物镜中心)投射到投影面上形成的透视影像。由于地面起伏、像片倾斜等原因，像点会发生位移，比例尺相应变化，图像变形。其位移规律为：$d = r \cdot h/H$，r 为像距，h 是物体高度，地形高差，H 为摄像机距地面的高度；H 越大，d 越小。所以，同幅航空像片的比例尺并不一致。航空像片的分辨率与比例尺紧密相关。利用航空摄影测量学中像点与对应地面点间的坐标关系，确定地面位置。航空像片可以进行重叠，航向重叠度一般 60%，旁向重叠度为 30%，像片的重叠意味着在相隔一定距离的不同位置拍摄同一目标可构成立体像。

就黑白像片而言,遗迹、遗物的图像包括:

(1)地貌地形的影像。一般来说,反射率大的地物图像浅,反射率小的像片色调深。航片上的地貌与绘图中的晕染法相似,用色调阴影来判断,阴影窄而色调暗则山势陡峭,阴影宽而色调淡表明山坡平缓。水系主要依色调、形状判读,河海界线明显、自然弯曲,湖泊池塘为封闭的曲线,湖水色调为均匀的暗色;水底有淤泥时,影像色调较深,水底清澈影像为浅灰色或白色。

(2)道路、居民地等自然物的影像。如居民地一般形状规则,尤其是城市居民网。道路网分铁路、公路,航片上铁路为浅灰色或灰色的均匀弧线,公路弧线曲率小,色调或深灰色或浅灰色,乡村小道弯弯曲曲,比周围农田色调浅。

(3)考古地面遗存。城垣废墟形状规整或时有间断,色泽较暗,阴影清晰。各种建筑和墓葬,形状较明显,圆形、方形、椭圆形、覆斗形,色调不一,或深或浅,容易判别。

(4)植被和农作物。航片上森林、植被轮廓显著,深暗发黑,色调不匀,草地为均匀的灰色影像,耕地菜园分界线分明,色调均匀,其色调在播种水分充足、生长期较深,成熟收割时较浅,沙漠颜色较浅。至于植被的影像色调、形状随季节、植被类型、比例尺的不同而差异明显(表6.2)。地面的植被色调较暗处即"正向"的植被标志(图6.4),其下多为淤土、填土;色调较浅者即"负向"植被标志,下面极有可能是道路、建筑遗存。从植被色调与周围差异的形状我们可以勾勒出古代遗迹的轮廓。

表6.2 谷类庄稼标记的颜色差异

	生长阶段	正成熟阶段	已成熟阶段
正标记	深绿	绿	浅黄
负标记	浅绿	开始变黄	"泥"黄
一般田野	中绿	改变颜色	黄

采自许志勇:《航空摄影与考古的基本方法》,《北方文物》2001年第1期。

(5)土壤标志。在土壤裸露和植被稀疏的地方,可以利用土壤标志寻找遗迹,如辽庆州城就是通过土壤标志发现了城墙、街道和建筑等地下遗存的[①](图6.5)。

① 宋宝泉、邢锡惠:《遥感考古学》,中州古籍出版社2000年版,第165页。

土壤标志在刚翻过的耕土层，久旱少雨干燥季节或暴雨后连续天晴三四天后，土壤标志的显示效果极为清晰，它以深色或浅色的线条表现出来（如黑线或深颜色表示古代沟壑，浅色表示堤岸或土墩残留物），在热红外影像、雷达影像中效果更佳，还能反映出航片不能反映的现象或特征。此外，土壤的差异还可通过土壤潮湿度的差异（即潮湿标志）和地面上霜雪融化的速度不同（即霜雪标志）表现出来。"潮湿标记有明显清晰的轮廓线，而不是锯齿线或像土壤标记一样的模糊线。"[①]霜雪标志无论在小雪霜或暴风雪（或一层厚霜）都表现明显。

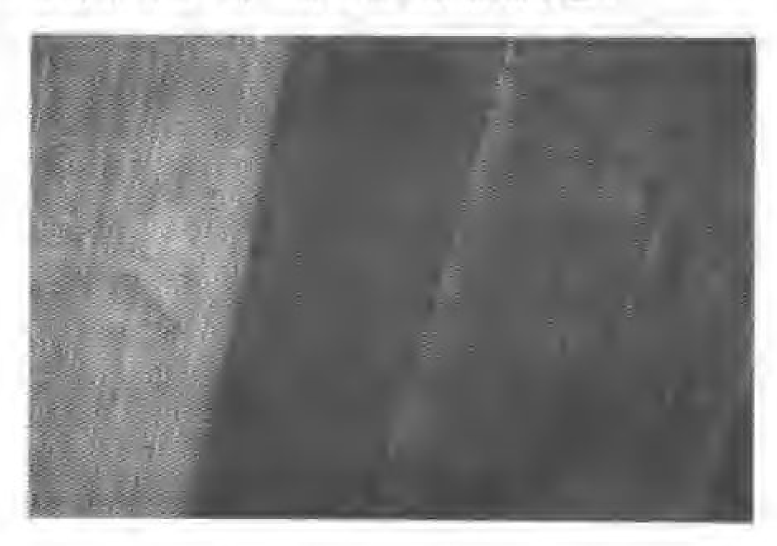


图6.4 德国巴伐利亚州哈尔斯德
文化寨堡遗址（正植被标志）航片图

彩色像片和红外像片的影像资料基本与黑白片影像相近，仅是物体的色调特征变为清晰易见的颜色特征，从颜色特征上更易于判别考古遗存。在判别这种像片时注意一些影响颜色的因素。彩色像片的颜色与光源、摄影高度、物体的宽度和照度、视觉、感光材料、曝光时间、药液等有关系；红外像片颜色主要取决于胶片的性能、地物的反射光谱特性、摄影水平、洗印加工水平等。如绿色植物呈红色，枯草地呈黄色，稻草堆呈白色和浅黄色，公路呈白色，居民点呈黑色或白色，河流、湖泊、水库则呈绿色、深蓝色、淡灰色。因而使用这两种像片时要多看不同比例、不同拍

① 许志勇编译：《航空摄影与考古的基本方法》，《北方文物》2001年第1期。



图6.5 辽庆州城街道和建筑遗址(阴影和土壤标志)
航空摄影像片(1997年摄)

摄时间、不同拍摄角度的像片,同时要考虑本次勘测的重点与目的。

2. 扫描图像的特点

扫描图像因扫描方式不同,可分为对目标物扫描的光机扫描图像和对影像面扫描的固体扫描仪和电视摄像机。

光机扫描图像又称为远红外图像,通常用热红外扫描仪扫描成像。常用的扫描方式有红外扫描和多光谱扫描,二者的成像过程基本相同,只不过前者是单波段图像,后者可同时获得从可见光到红外多个波段的图像。红外扫描仪利用扫描棱镜或平面镜旋转或振动对地面一行行作横向扫描,由于远红外扫描片的成像方式是连续的,便构成一条不分幅的连续条带状图像,简而言之,热红外扫描仪将辐射波段分成几个独立的通道分别记录,最后拼接成一幅图像。光机扫描像片是由一行行扫描线构成,每条扫描线有一条投影中心,故扫描的影像是行中心投影和多中心投影。由于光机扫描像片为条带影像,同一条影像不可能构成立体图像,但可利用相邻航带上具有一定重叠度的两张图像进行立体观察。

远红外像片色调的不同,反映了该波段上热辐射能量的大小,因而其物理特性主要取决于地物的辐射温度(发射率和表面温度),即地物越热,影像越亮(浅)。热红外像片的色调与摄影的时间和天气有关,这两者也是影响地物表面温度的重要因素,如水与陆地有不同的热惯量,白天水的色调比土壤深,而夜晚则相反。在晴朗无风的夜间条件下,各种地物表现与辐射强度相一致的色调特征;岩石、沙、泥

土夜间成像时呈淡灰色，水呈浅灰色或白色，潮湿的低洼地呈暗色调，树林呈浅灰色或白色，草地呈黑色或暗色调，道路呈浅灰色或白色，金属呈黑色调。为了定量分析和纠正辐射，有的扫描仪上带有参考辐射源。

固体扫描仪和电视摄像机的收集系统不直接对地面扫描，而是先用光学系统将目标的辐射信息聚焦于机内检测系统的一个靶面或光敏面上，形成一幅影像，再利用摄像管中的电子束对靶面扫描以收集信息，或依靠电荷耦合器件（CCD）组成的阵列作电子自扫描来获得信息。

固体扫描仪主要由CCD、探测器和光学系统组成，是推帚式扫描成像，即探测器线列随平台的前进运动获得地面的一条条条带覆盖，所取得的图像为行中心投影，变形小，分辨率高，还可用磁带直接记录。目前法国SPOT卫星上的"可见光高分辨率扫描仪"就是这种CCD线列探测器推帚式扫描成像。

电视摄像机是用摄像管内的电子束对靶面的像逐点扫描，其核心是摄像管。摄像管目前有光电导摄像管和超正析摄像管两大类。美国陆地卫星1、2号上装有3台反束光导管（RBV），其成像扫描方式与光电导摄像管相同，信号提取方式则与超正析摄像管相同，其影像质量和分辨率高，但只能获得可见光和近红外波谱段内的图像，且仪器稳定性差。

3．侧视雷达图像

侧视雷达（Side－looking Radar或Side－looking Airborne Radar，简称SLR或SLAR）因它的天线面向飞行器的一侧而得名。侧视雷达成像过程为：侧视雷达垂直于飞行路线向地面发射微波脉冲，地物的反射脉冲按距离的远近依次被雷达接收，便形成垂直于飞行方向的条带状地物微波反射图像。随飞行器的继续飞行，获取的一条条地物微波反射图像拼接成一幅微波遥感图像。①

侧视雷达是自己发射微波、自己接受反射微波的主动式遥感。微波遥感具有独特的优势：

（1）微波遥感不受天气和时间的限制，是全天候的，在各种条件下都能穿透大气层。

（2）微波的穿透力极强，其穿透深度因地物性质而异，且随波长增加而增加，

① 蒋宏耀、张立敏：《考古地球物理学》，科学出版社2000年版，第171页。

可穿过地面厚厚的植被获得地下的较详细的信息。

(3) 地物对微波的反射与对可见光和热红外电磁波的反射无关,不受干扰。

雷达图像的分辨率较摄影像片的分辨率低,色调层次少,判断也比较困难,所以判读侧视雷达图像时要注意色调、阴影和纹理特征。色调的深浅取决于地物后向散射(即朝向天线方向返回的散射波)回波的强弱,回波越强,天线上色调越浅。地物的后向散射回波受地物表面的粗糙度、坡度、雷达使用的波长、雷达波照射俯角、雷达微波的极化性质的影响。阴影指那些因受地形起伏的阻挡而使雷达特性不能到达的地方。阴影的长度、方向与航向垂直,与雷达波的射向一致。阴影既可使雷达图像反差大、立体感强,同时也会造成图像的横向失真和信息损失。纹理是雷达图像上呈斑点状或斑状结构的一组回波。

不同的地物在雷达图像上呈现出不同的影像特征。回波较强的丘陵与山地呈浅灰色斑状,而回波较弱的平原、田野呈灰色或深灰色。平静的水面呈暗影,当水面有波浪时,暗影区会出现一些亮点,较大河流的河面为暗色,而河堤色调明亮,较小河流呈弯曲的黑色丝带状。植被在雷达图像上通常表现出中等回波,草地呈暗灰色,森林为灰色斑点状,旱地呈灰色,沼泽和水田呈黑色。城市、城镇的建筑材料大多具有良好的雷达反射率,呈现较明亮的色调;而木质建筑物的小城镇和农村居民点回波弱,甚至无回波。铁路由铁轨和路堤组成的回波,桥梁则按建筑材料的不同而产生不同的回波,平滑的公路等则回波弱或无回波。①

(二) 遥感图像的处理

对于获取的遥感资料,需经过处理才可判读。处理方法可采用光学处理和计算机处理,目前以后者为主。计算机处理时,将图像分成许多按行列排列的小单元(称为像元)。每个像元为一个数字,表示图像所反映的物理量在该像元处的数值。一幅图像就是由数值构成的矩阵,可进行各种运算处理。②

预处理是遥感特性处理的第一个重要环节。内容包括几何校正、辐射校正、大气校正、图像配准等图像恢复工作,还要将初步加工过的图像进行特殊处理,将其转化成计算机专用磁带以供计算机使用。

---

① 于光远主编:《信息新视角——悄然崛起的地球空间信息学》,湖北教育出版社2000年版,第217—218页。

② 蒋宏耀等:《考古地球物理学》,科学出版社2000年版,第176页。

第二,是对遥感图像进行图像增强处理。其实质是增强图像上各种判读类别之间的反差,以改善遥感图像目读的视觉效果。图像增强可分为光学增强和数字增强。光学增强的特点是直观、快速,操作简单,耗资少,方法包括几种相关掩模法(反差调整、彩色合成、假彩色密度分割、等照度变换、黑白发色、边缘增强、影像相减、专题提取)和相干光学处理。数字增强借助于计算机,将图像密度进行一定的数字运算,即将图像数字化的模数转换。

第三,用统计的方法对图像进行分类,提取有相似波谱特征的像元,以便计算机自动识别。

(三)遥感图像的判读

依识别的方式,航片识读又可分为目视判读(简称目读)和计算机判读。目读使判断者的判断思维与识别对象紧密联系,并调节思维方式,对判读对象的个别或特殊疑点可做出合理的推测和解释;但目读不可避免地带有主观性,尤其对灰度反差与分辨率很差的航片,目视者存在一定困难。计算机判读通过对各类地物像素密度值统计、运算、对比、归纳实行判读,运用计算机图像处理技术,可以消除不利因素的干扰,突出强调有用信息,提高航片信息的利用率;但对一些新的现象往往缺乏及时的解释。

一般情况下,先是目读,并在目视判断的基础上带着问题进行计算机识读,最后再目视判读。判读方法有直判法、对比法、邻比法、推断法、证据收敛法、纹形区划法、地貌分区法、线性追踪法①。

目读根据地物的特征来确定。不同的地物具有不同的光谱特征、空间特征、时间特征、偏振特性等,这些在影像上的表现形式不同,这些表现形式被称为判读标志。地物的光谱特征在影像上表现为地物的波谱响应曲线。地物的空间特征直接判读标志有影像的形状、大小、颜色与色调、阴影、位置、结构、纹理、立体外貌和分辨率;间接判读标志包括水系、地貌、土质、植被、气候、人类活动。地物的发展变化因时而异,其时间特性以光谱特征和空间特征的变化在影像上表现出来。

目读的方法因比例尺、图像特征而不同。一般过程为:首先是总体观察,观察

① 宋宝泉、邵锡惠:《遥感考古学》,中州古籍出版社 2000 年版,第 134—136 页。

各种直接判读标志，把图像分成大类别以及其他易于识别的地面特征。接着进行对比分析，包括多波段图像、多时域图像、多类型图像的对比分析和各判读标志的对比分析，从而识别出图像上有所显示而人眼又不能区分的物体。第三步是作综合分析，主要用间接判读标志，结合地图资料和统计资料。最后要考虑参数分析，包括遥感区域内样本的辐射特性数据、大气透过率、遥感器响应率等。目读的原则是先整体后局部，先已知后未知。

计算机自动识别的基础是模式识别、地物在特征空间中聚类的统计特性、鉴别函数和判别边界。其方法分为监督法和非监督法。监督法又称训练场地法，用已知的地物的某些物理量区识别未知，采用的方法包括模式识别、判别分析、最小距离分类、最大似然率分析。非监督法是在未知或知道不完整资料的情况下，利用样区内的像元在特征空间数据自然集群的规律建立各类别的标志，然后以之为据进行分类，这种方法只能将各类别分开，类别的性质仍需结合地物的光谱图像和其他图像确定。非监督法包括回归分析、趋势分析、集群分析、模糊数学法。此外，还有一种将监督法和非监督法结合起来的联合分类法。其过程是：先对数据进行非监督分类，产生分类样区的原始分类图，再用野外测量的数据评价分类图，将确定的新的分类标志用监督法对原来的群类修改，最后将修改后的群类用于整幅图像的分类。

四、遥感与航空摄影考古的程序

遥感考古工作到目前已开展了几十年，积累了丰富的经验。各国根据本国的考古特点，应用和测试了许多不同的现代遥感信息和航空像片处理解译方法。尽管方式不同，但遥感考古的过程基本相似，即进行遥感测量，解译定位，通过分析对比，研究地上、地下文物遗存的变迁，并结合常规地表调查方法，现场验证与补充，完成定性分析。

下面以秦始皇陵的遥感考古为例①。这次探测历时三年，使用多种探测仪器，收获颇丰。其工作程序为：资料收集及现场踏勘→地面波谱测试→遥感飞行→已知区文物点群判释→未知区文物遗址判释→地质体解译→野外调查及验证。

① 宋德闻等：《秦始皇陵园的摄影测量与遥感工程》，《文物》1990年第7期。

(一) 勘探前的准备工作

首先,也是最重要的工作是资料收集与分析,旨在对勘探地区的自然环境、文化面貌有个基本概念。对该地区的各类资料,主要有文献资料(历史记载)、已有的考古调查(包括物探、手探)与发掘报告(包括原来的文物、发掘的遗物)、古今各类地图(地质图、地貌图、土壤图、水文图、气候图、植被图、物候图等)、现存的各种类型、各种比例尺的航空遥感资料,进行综合分析,弄清所测区的遗迹大致面貌特征、地理自然环境和条件等,查明还缺少哪些信息,在分析过程中可根据需要将遥感像片和地图镶嵌成整幅图、局部扩大或调整、像片纠正、影像色调的调整、对比度的增强(现代的卫星遥感影像资料一般都是数字纯文件,便于在计算机上进行各种信息的自动分类、提取和分析等处理)。在进行宏观分析和重点解译,发现有考古价值的信息或现象后,画一个草图并做一些必要的记录,诸如判读的考古学文化特征、重要发现、疑问、判读日期和判读人;同时要建立资料数据库,将航片、地图、文献等所有资料归档保存。

接着,结合飞行和经费条件等制定出田野调查和勘察计划,内容包括工作区域、飞行路线、勘察时间、经费预算以及可以实施的工作方案。

除了资料的整理和分析外,还要进行人员准备、记录准备。当上报的工作方案得到审批,且申请经费到位后,便要着手勘察队的组织。勘察队的人员应包括领队、机组人员、勘察和摄影人员。与此同时,要联系飞机(租借或购买)、准备相应的通讯导航设备以及摄影器材。

在准备阶段,由于空中飞行的特殊性,飞行空域的申报是必要的。

秦始皇陵位于陕西省临潼县,周围分布着大量珍贵的地上地下文物,对其作无损伤的勘探以了解其布局尤为必要。为了揭开世界瞩目的秦陵奥秘,20 世纪 80 年代末考古工作者对秦始皇陵园进行了摄影测量和遥感考察。根据当时的资料,该工程的研究重点确定为应用航空及低空摄影测量,精确测定秦陵及兵马俑博物馆的现状图、影像图、俑坑军阵位置图;用近景摄影测量测定各类典型兵马俑、秦代兵器的立面图、等值线图;用航空遥感技术与考古发掘方法相结合,探查和发现地下文物的分布、了解滑坡等灾害地质现象对陵园内文物的影响及破坏。

勘探的范围为 60 平方公里,经度为 109°11′15″ ~ 109°18′,纬度为 34°21′45″ ~ 34°24′30″,全部陵园包括在内。航空遥感的设备包括:加拿大“双水獭”专业航摄飞

机(DHC－6 Twin Otter Srs. Ⅲ)、瑞士 RC－10 航摄机(f≈153.639 毫米,像幅 23 厘米×23 厘米)、上海技术物理所 DGS－1 型组合式多光谱红外扫描仪(Model DGS－1 assemble multi－spectral scanner),仪器采用实时显示和高密度磁带机记录。

(二) 野外实地勘察

飞机起飞后,开始遥感勘察工作。勘察人员在飞机上向两侧或一侧观察,寻找有无遗迹迹象。当发现可能有遗迹迹象时,要减慢飞行速度,打开机窗或舱门,然后在不同高度盘旋飞行,进行观察,选择最佳的拍摄角度,用手握小型或中型相机倾斜拍摄,以便拍摄出地表的起伏和阴影效果①。野外勘察时,根据遗存的规模和飞行高度,或者从宏观到微观勘察,或者从微观到宏观勘察。

在勘察过程中,一定要做好记录。勘察记录包括图纸标示(即在工作图上用各种符号标示出观察到的各种现象)、文字记录(必要时辅以录音记录)、摄影记录。最后以表格的形式,将观察到的现象作一汇总(表 6.3)。

野外勘察,主要是进行必要的探测和验证,通过有重点地将航片、原先资料所反映情况同实地相对照,特别是与草图上标出的遗迹部分相对照,可为判读时出现的疑问寻找答案,必要时还要进行纠正和勘察、摄影记录,尤其对于新的发现,要做详尽的各种记录。在这一阶段,只有将多种遥感考古技术与地球物理探测和地面调查相结合,才能获取全面的、现实性强的数据资料,才能建立航片解释的标志。

仍以秦始皇陵为例,该次工程的野外踏勘与现场红外测温同时进行。在已知文物点和地质点上,布置了 6 条热红外测温剖面,选择 45 个测温点(打孔,直径 5 厘米,深 1 米),进行 24 小时连续测温,取得已知地面物的红外辐射温度特征及日周期变化规律。配合遥感飞行进行同步测温,取得飞行瞬时温度数据,为解译提供依据。

接着,实施遥感飞行,同时进行摄影和扫描记录。摄影方式分为:

(1) 彩红外摄影,时间是 1985 年 11 月 8 日。$H_{绝}$ = 1600 米时,比例尺为 1∶7300;$H_{绝}$ = 2000 米时,比例尺为 1∶9400。共获 161 张像片,色彩层次较分明,无云遮盖。

---

① 中国历史博物馆遥感与航空摄影考古中心、内蒙古自治区文物考古研究所:《内蒙古东南部航空摄影考古报告》,科学出版社 2002 年版,第 3 页。

表 6.3　考古航空勘察记录表

<table>
<tr><td colspan="6">项目名称：　　　　　　　　　　　　　　日期：　年　月　日</td></tr>
<tr><td colspan="6">飞行航线：</td></tr>
<tr><td colspan="6">天气：　云量/云高：　风向/风速：　气温：　℃　日落时间：</td></tr>
<tr><td>飞机编号：</td><td colspan="5">起飞机场：　跑道：　场压：　风向/风速：　起飞时间：</td></tr>
<tr><td>飞机型号：</td><td colspan="5">降落机场：　跑道：　场压：　风向/风速：　起飞时间：</td></tr>
<tr><td colspan="6">驾驶员：　副驾驶员：　领航：　勘察：　摄影：</td></tr>
<tr><td>地形图</td><td>位置</td><td>遗迹号</td><td>勘察记录</td><td>胶卷号</td><td>照片号</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

采自宋宝泉、邵锡惠：《遥感考古学》，中州古籍出版社 2000 年版。

（2）黑白摄影，时间是 1985 年 12 月 23 日。摄影比例尺、绝对航高值同上，共获 182 张像片，重叠符合要求，影像清晰。目标物扫描采用热红外扫描，共获 74 张

扫描图像。A. 日航：1985 年 11 月 1 日 13 ~ 15 时，$H_{绝}$ = 2000 米，比例尺 1∶18000 ~ 1∶20000，工作波段 8 ~ 12 微米，传感器定标范围（BB_1—BB_2）辐射温差 ΔT = 10.4 ~ 26.4℃，地物红外辐射能量在温度图像上显示较充分，南北向扫描线引起图像拉长，且出现锯齿状畸变。B. 夜航：1985 年 11 月 4 日凌晨 5 ~ 7 时，ΔT = 4.6 ~ 10.4℃，该值过小，灰阶层次少，影响了部分地物显示。

该工程用不同的飞行器，摄取了多用途的照片。1981 年用遥控靶机、航甲 11 - 10 相机（像幅 7 厘米 × 8 厘米，f = 100 毫米）进行低空摄影，制作了 1∶2500 比例尺兵马俑博物馆像片图和 1∶2000 秦陵遗址地形图。1985 年遥感飞行获得 1∶7300 的黑白航片，测绘了 1∶1000 秦始皇兵马俑博物馆现状图，准确测定了一号展览大厅及近旁二、三号坑位置。1987 年用海燕号动力滑翔机、HC_1 - 1 相机（18 米 × 18 米，f = 100 毫米）进行低空摄影，摄取了彩红外片、彩色反转片，用于解译矿带分布，发现地下资源特征信息，研究滑坡等地质现象。

（三）信息资料的详细分析

本阶段通过对各种信息进行综合分析，制定出一张详细的考古勘探解释图，进而确定研究的目标、方法、步骤。从新的航片上的色调、颜色分析，尽可能找出所有的考古遗迹或现象，与以前的资料对比，并增添新的内容。同时要做好记录归档，标明全部的古迹点群，还可制定出比例适宜的古迹分布图。

接着，工作人员对获取的图像进行了解译，主要是建立影像标志。如秦始皇陵园的这次调查便通过获取的图像调查对比，建立已知文物点、辐射温度曲线与彩红外和热红外图像之间的对应关系。热红外图像的解译标志与黑白像片、多光谱像片类似，仍然是色调、形状、大小及阴影，但含意不同。经比较，可区分出古墓葬、古城垣址（夯土层）及其他类型的古遗址三大类，精心选择典型像片，并详细列出有关文物古迹影像标志表。

（四）野外验证

对于遥感资料的分析，一般要进行实地的判释和验证，可以采取野外调查、局部的研究发掘等手段。

如秦始皇陵的遥感资料与实地验证表明，33 处已知的古迹点群中有 28 处点群的图像异常与实地相符，特别对埋藏较浅（约 1 米）、范围较大的遗址判释效果较好，如秦陵内外城的长方形双重城垣，图像上标志清楚。此外，在三种图像的同

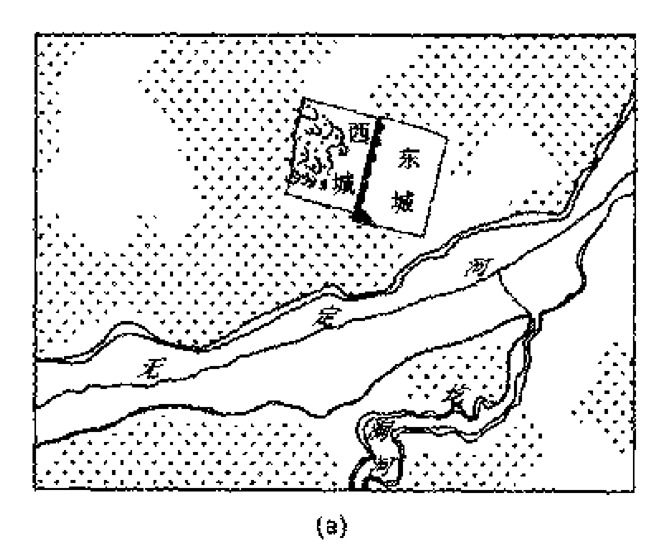
一范围内，均发现有一条带状影像异常，其所反映的地物是一条古代人工修造的壕沟。经发掘，里面有唐代碎砖瓦及陶制水道等物。考古专家确认，此即为埋没了一千多年的唐华清宫南界。另外，在骊山风景区的图片上，发现4条线性影像围成的块体自南向北排列，通过解译，圈定为四级规模大小不等的滑坡，滑坡目前仍在活动，尤其是位于老君殿之下的四级滑坡，其下方为华清池及唐华清宫遗址范围，已构成对这些名胜的威胁。总之，此次遥感解译主要图片有12幅之多，文物已知区的图像解译准确率约85%，在未知区解译，发现了已埋没了千余年的唐华清宫南界，圈定了四级仍在活动的滑坡位置。热红外测温数据、辐射温度变化曲线图与数学模型计算的结果一致，从而反映出文物点与周围地物的辐射温差。

（五）综合分析和研究

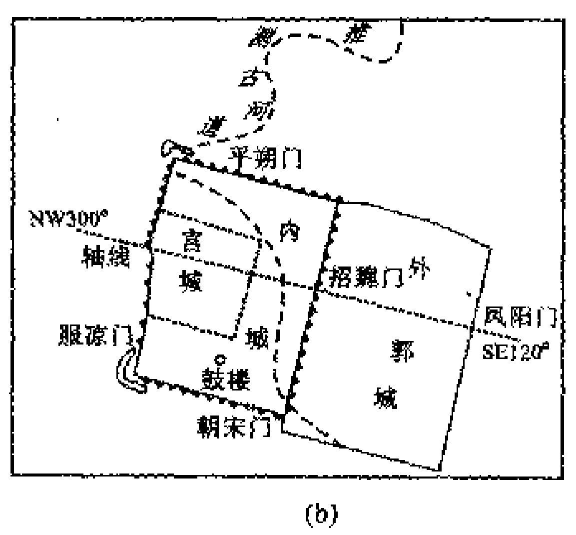
对所有的野外工作、以前的信息进行了综合分析，勾勒出一张详细的遗迹分布图，对所有的疑点进行解释。最后进一步做断代等方面研究，写成本次工作的报告。

特别要注意的是，在收集或选择遥感影像时，要根据遗迹或现象以及植被的现状选择不同类型的遥感资料，并根据各种遗迹的特征在适合的季节时间内收集资料，如农作物生长旺季、霜雪融化时，而且要拍垂直航片和选择合适的拍摄角度，以低太阳的高度角（早晨或傍晚）时倾斜摄影的航片显示效果较好（因为有些遗存如北京的圆明园遗址的地面视觉特征只能从上向下或一定倾角才能看清）。此外，许多遥感像片的识别标志受到不同程度的干扰或破坏，如现代除草剂可以干扰农作物标记，潮湿标记的时间比较短暂（常常同一天就可消失），不同时间不同地区的影片标志都不同，所以，在遥感考古时不仅要收集各种遥感资料，而且要作以仔细的分析，排除可疑因素，常常采取遥感与地面物探、踏察相结合的形式。

北京大学的邓辉等人利用彩红外航空影像对统万城作了分析和复原（图6.6），探讨了南北方文化的交流、自然环境变迁与人类的关系。他们首先借助两个相隔100多年的调查报告勾画出统万城的粗略轮廓；接着判读了1986年拍摄的彩红外航空影像，影像资料显示其有东西两座城毗连，城角的角楼台基和城墙上的马面历历可辨，两城四周和城内的部分地段可见流沙分布。研究者结合文献分析，认为东西两城实际上是外郭城和内城。从影像上还可判读出内城的四面城门、外郭城东墙中部偏北的城门及瓮城；影像上西城西半部流沙覆盖的高地上隐隐约



(a)



(b)

图 6.6　根据文献和彩红外航空摄影复原的统万城形态图

(a) 根据文献复原的统万城位置示意图　(b) 根据彩红外航空影像判读复原的统万城形态图

采自邓辉等:《利用彩红外航空影像对统万城的再研究》,《考古》2003 年第 1 期。

约可辨的城墙痕迹,是当时的宫城遗址。结合文献资料可以得出:统万城仿效中原汉族的都城营造制度,航空影像上显示的外郭城东门、内城的东门和宫城的东门位于一条接近东西向的直线上,这是该城的轴线,宫殿、路寝、社稷当沿这条轴线分布。统万城坐西朝东的布局,又显示北方游牧民族尚东的文化传统。此外,该城的形态反映出中原地区天人感应、法天象地的思想。统万城的兴废揭示了该地区人地关系的变化。航空影像说明内城的北部、西部均有古河道,结合文献记载,该城建立之初,周围草地连绵、溪流环绕、人口众多。575 年之后,草原变成了沙地,该城终因自然环境的恶化、政治、军事等原因被废弃了①。

第二节　地面物探

如前所述,遥感摄影影像可以提供遗存的某些迹象、轮廓或大致分布范围,获得遗迹的宏观形象。但是,对于遗存详细的分布内涵和实际边界,以及遗迹的更多

---

① 邓辉等:《利用彩红外航空影像对统万城的再研究》,《考古》2003 年第 1 期。

细部情况,受各种条件的限制,则要依靠地面勘探。地面勘探包括传统探查和地面物探。

一、物探的概念及原理

随着现代基建规模的扩大和加速,考古工作任务加重。与此同时,空间技术、光电技术、计算机技术的发展为人们快速、有效地进行考古勘探提供了技术和条件。1946年,英国的安特靳斯(R. C. AtKinson)用电阻率勘探法研究多彻斯特(Dorchester)新石器时期地下遗址,这是地球物理勘探法的首次应用。从20世纪50年代起,浅层地球物理(Nearsurface Geophysics)等探测方法被引人考古勘探中,得到学术界的广泛重视,逐渐形成了地球物理勘探,简称物探。在美国、英国、德国、日本、泰国、加拿大、匈牙利、墨西哥以及中东的一些国家和地区,运用考古物探(我们将物探在考古中的应用称之为考古物探)已获得了成功,并提出了“瞄准目标法”的工作方式,即先圈定异常范围,再进一步仔细调查。

物探最成功的例子是墨西哥圣棱茨特洛克蒂兰(San Lorezo Tenooktlan)的勘探,该地以戴头盔巨大石雕像而闻名于世。一些头像因自然侵蚀而露出地表,为了寻找更多的地下雕像,考古人员根据雕像由花岗岩制成,具有强烈的磁性的特点,决定采用磁法勘探。于是在0.5平方公里的范围分布1米×1米的测网,测点80 000个,使用分辨率为0.1纳特的磁力仪,经过分析处理得到100多个形态较好的磁异常。后对其中20个异常点发掘,取得了意想不到的收获,出土了奥尔麦克主神雕像、圣餐台、雕有符号图案的盘子及其他数百件文物,这次的收获品引起很大的轰动。[①]

考古物探之所以兴起,在于其具有许多传统勘探无法比拟的优点:

(1) 无损伤。物探是通过地面“遥感”而工作,不存在对考古遗存直接的损坏。

(2) 准确、多信息。考古物探不仅能指出遗迹所在地和分布范围,还能定性地提供遗迹的地下分布位置,适合于探寻一个遗址范围内部遗存的分布情况。

(3) 简便高效。物探的仪器与遥感设备相比较更易于操作,而且探测速度迅

① 朱俊英:《考古勘探》,科学出版社1996年版,第82页。

速，节省大量人力、物力和时间。

考古物探的原理很简单，就是考古遗存改变了所在地区地表的物理、化学结构，使土壤物理性质出现异常现象。考古遗迹、遗物埋藏在地下形成的土质结构、密度、含水量与周围天然沉积物有差异，表现为土壤密度、磁性、电性、导热性、弹性、放射性较附近普遍增大或减小。例如，夯土系人为夯实密结，电阻率为高阻特征，且磁化率为高磁异常；而沟穴等填土虚松，电阻率小，磁化率亦小。不同的物性差异可通过相应的仪器观察到，并通过计算机从一系列异常数据中寻找其地球物理场的分布，进而推断遗迹的特征和文化性质。

考古物探方法是基于遗存与周围介质的某个或某些物理特性的差异而进行的，所以在探测之前就必须了解探测目标及其周围介质的特性，找出它们之间的物性差别，这是考古物探的前提。当然，在地下也存在一些与探察目标类似的伪异常。此外，由于地球表面磁场的复杂性，很容易在零散杂乱的物探数据中引入干扰信息，如铁栏、广播电台、建筑物、废铁渣等。所以，要分辨探察目标中的真伪异常和干扰信息，找出它们的物性差异。

几乎所有的地球物理办法都可分辨出一些真伪异常，但并不能真正解决问题。加之考古资料的物性差异不大，就不可避免地影响了物探结果。此外，与遥感考古相比较，物理勘探范围小，因而信息量受到限制。故而，在物探中，尽力避免单一形式的探测，最好是遥感、物探多种方式相结合，用不同的物理办法来综合勘察，扬长避短，互相参照纠正。

二、考古物探的工作程序

考古物探的工作步骤与遥感考古相似。事实上，所有方法的勘探程序都接近。

第一步，资料收集分析。在决定某一地区要进行物探后，要着手收集该地区的地质物探资料、原来的考古发掘报告以及各种文献资料，进行初步分析。同时要进行现场踏勘，了解所探地区的地质地貌等物理特征和考古现象，必要时可用仪器测试。

第二步，工作设计。根据所探地区的物理特性决定使用何种物探工具，因为任何物理工具都有它自己特定的用途范围。原则上应选择成本低、效率高、效果佳的方法，一般综合物探（两者或两者以上）的方法效果更好。普探用磁法进行大面积勘探，再在磁异常的中心用地质雷达、电阻率法等分层精度高的方法。如果遗迹分布范围明确，仅需了解地下状况，可以用地质雷达或电法。需要注意的是，在使用

各种方法前,要对周围工作环境进行了解,尽量排除干扰。

工作设计的另一个重要内容是进行区域系统规则的布局,相当于考古工作的布方。一般在测量区先标出 20 米×20 米的区域,然后划分成若干小的网格,称为测网(图 6.7),考古勘探常见 1 米×1 米或 2 米×1 米或 1 米×0.5 米的测网。测网的网格间距视所测遗迹的情况而定,间距越小,获得的信息就越多,所测绘的图就越详细,同时测量的时间就越长。

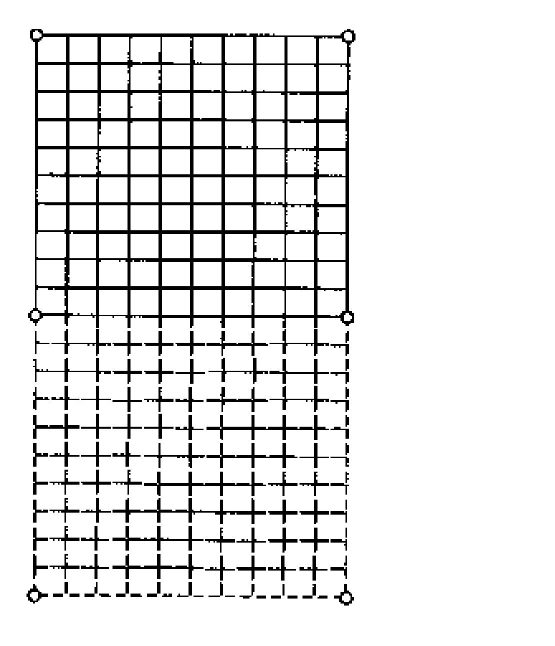


图 6.7 考古物探测网示意图

第三步,野外物探。按测网布局在地面布置并把测网四角用木桩固定,按编号进行系统的勘测、记录。

第四步,资料的解释和结论。将野外获取的数据资料输入计算机进行处理(运用地球物理场的理论和地质理论),主要是正演和反演计算,并转化成数字化的图像。接着,参考地区特征判定异常点及其形成的形状、走向与分布范围。最后结合其他考古、文献材料,作定性、定量的分析,确定考古遗迹的地下情况,如深度、分布范围、几何形状等。

三、考古物探的类型

从理论上讲,所有的地球物理勘探方法都适合于考古勘探,物探法有电阻率法、电磁法、探地雷达法、重力法、热勘探、地震法、激发极化法、自然电场法、放射性勘探法(γ 射线谱仪)、电磁诱导法(EM 法)、核子地球物理勘探法等。实际上,物探受探测对象物理特性的限制,不可能对任何考古遗存都有用,最常见有效的是前三种,其余的仍处于尝试、改进阶段。

(一) 电阻率法

考古遗存与周围的介质,往往存在电性方面的差异。不仅如此,即便是同类的考古遗存,如土坑墓中的填土与周围没有动扰过的土,也有电性的差别。电法勘探

就是建立在被测物与周围介质电性的差异之上。其中,考古工作中应用电法较多的是电阻率法、探地雷达法。

电阻率法勘探是通过探测遗迹、遗物与周围土壤电阻的差异,来确定目标物的深度、分布范围、几何形状。考古遗存与土壤具有不同的质地(成分)、疏密度(孔隙水的附存状态)、含水量(渗透率)、饱和度、电离子浓度、温度等,导致了它们不同的电阻率。一般情况下,金属物品(如青铜器、铁器、金银器)属于导电体,而岩石和土壤则属于不导电体;但在潮湿的情况下,这二者也会导电,而且岩石比土壤电阻率高,据此可判断地下石质建筑。埋在土壤中的城址、道路因含水量少而属高电阻区,而填满土壤的古代沟渠含水量多,成为低电阻区。根据这些高、低电阻异常计算出结果可形成曲线图(图 6.8)。

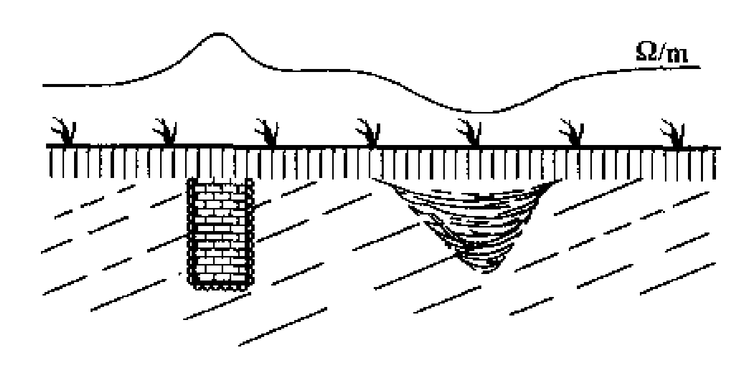


图 6.8　遗迹的电阻率图

电阻率法的工作原理如图 6.9 所示,在被测点的地表两侧装上测量电极和供电电极,在土壤中建立一个人工电场,通过测定由之形成的电位差转化的电阻率值而反映文物的电性结构。根据欧姆定律,电阻率 $\rho = \Delta V/I$,ΔV 为测点电压之间的电位差,I 为测点某深度的电流。但是,由于所测的地下介质并非均匀,又由于地表起伏等原因,故而测到的电阻率不是真电阻率,而是电流分布范围内各种电阻率之综合反映,称为视电阻率。视电阻率的变化直接反映地下综合电阻的变化,工作人员通过研究绘制的视电阻率曲线图,可推断地下物体的位置、形状和特征。

用电阻率法勘探操作简便(图 6.10),将电阻率仪(由电极、一个交流电源和一个测电阻的表头组成)的对称四极插入地面,给两个外电极通以电流,从两个内电极间的电压差和电流强度计算出所测地的视电阻率值。

用电阻率法可以探测到遗迹的埋藏深度,测绘出遗迹的地层剖面图和平面分

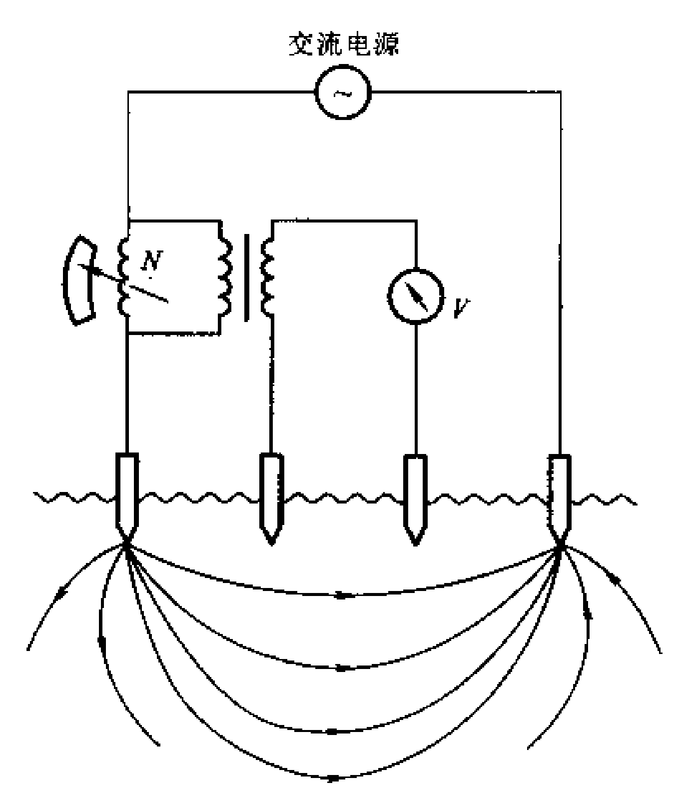


图 6.9　电阻率四电极排列和测量原理示意图

布图，适合勘查很深的古墓和直线形古道路、古城墙。电阻率法常用的装置为对称四极装置，依据其移动方式，可分为电剖面法和电测深法。

1. 电剖面法

电剖面法可以探测到某一深度范围内的遗存的分布范围、走向等平面布局特征和地下遗迹的地层剖面。它是将探查点控制在某一固定深度，然后在地面上逐点勘查此深度剖面上的地下物体存在情况，得出该深度的视电阻率剖面图。

电剖面法的电极布置一般采用平行式和垂直式两种。平行式的具体操作是：在探测前，要先了解所测遗存的埋藏深度，以便选择合适的通电电极间距。测量时，保持电极阵列（一般采用标准温纳电极阵列 Wenner），在一条测量线上同一方向移动电极阵列，将所测得的数据标在坐标纸上并将各测点数值连成曲线，便可得到某一剖面线上的视电阻率假设二维剖面图，进而求得该剖面线上的剖面图。垂直式与平行式的方法类似，其不同在于测量工作分布在垂直的两条直线或方向上，可以更好地探测到遗迹的平面分布图。



图6.10 电阻率法作业图(本照片由李秀珍提供)

工作人员用电剖面法勘探了某地的古河道(图6.11)①,从该河道的视电阻率曲线图上可以看出,河床的填充物和盖层是砂卵石层,电阻率高;河底和两岸是砂黏土,电阻率低。

2. 电测深法

电测深法主要探测遗迹垂直方向上的电性变化。该法是先固定勘查点位置,然后垂直向下勘查各深度地下物体的埋藏情况;在施加电压固定的情况下,勘查深度可通过改变连接电源的外电极间距来控制②。

在实际工作中,先用别的方法划定异常现象在地面的分布范围,再用电测深法勘探其在垂直方向上的布局。具体操作过程是:先按照标准温纳电极布阵测出某一点的第一个电阻率数据;再将两个测量电极放在原位不动,将外侧两个通电电极在原布阵直线上按原电极间距等距离外移,测出第二个数据。依此类推,通过逐步等距加大通电电极间距逐级扩大电流的透地深度,测出一组视电阻率值,并将之连接成曲线,就此可推知遗迹的性质和埋藏深度。

① 武汉地质学院金属物探教研室:《电法勘探教程》,地质出版社1980年版。
② 金国樵等:《物理考古学》,上海科学技术出版社1989年版,第62页。

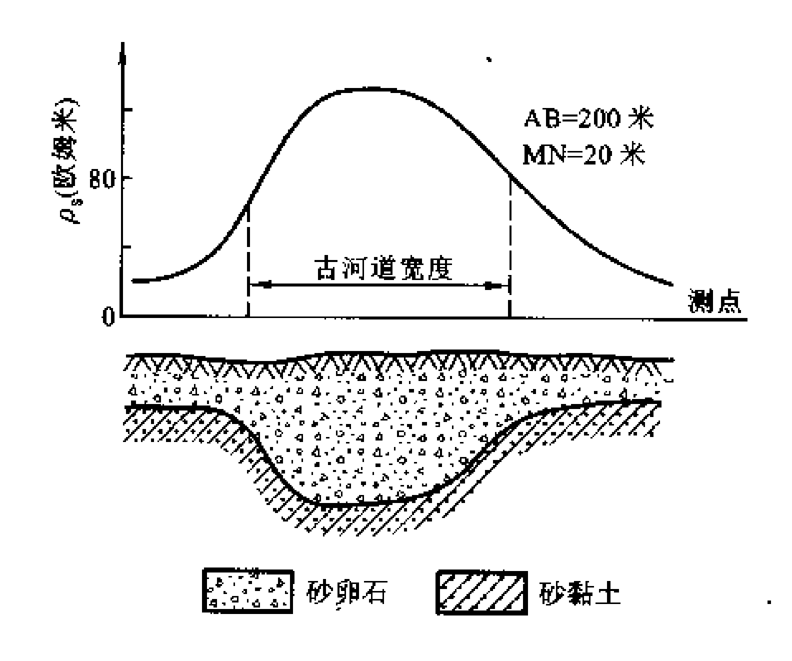


图 6.11　古河道的剖面电阻率曲线图

采自武汉地质学院金属物探教研室:《电法勘探教程》,地质出版社 1980 年版。

我国曾用电阻率法勘查了新疆拜城克孜尔千佛洞隐埋的石窟①。

电阻率法的设备简单,操作容易,不受外来磁场、功率源、金属干扰的影响。但是,电阻率法也有一些限制,首先是其操作费时;其次,电阻率受制于土壤的空气流通和湿度、气候、农耕,甚至所测地区的近期降雨量、遗址地质情况(包括地下水位)以及地面的植被状况等因素,可能造成所测数据的误差。所以,电阻率法并不适合探测规模较大的遗迹。

此外,表土和下层土的不均性也会扰乱所测物的电阻率,许多工业问题的严重干扰曾一度困扰着考古工作人员。近十几年来发展的高密度电阻率法经过改进,受工业干扰影响不大,而且采集速度快、探测异常反应明显、分辨率高、探测范围大。

3. 高密度电阻率法

高密度电阻率法原理与电阻率法相同,其不同之处在于集测各种电剖面与电测深于一体。该法采用布阵式密集观测,整条剖面的测量电极(几十根至几百根)

① 钟世航:《用物探方法解决文物保护和考古中的某些难题》,《地球物理学报》1991 年第 34 卷第 5 期。

一次布置完成①。

野外工作时，沿测线高密度、等距离布置一大批电极，通过多心电缆，将这些电极连接到多路电极转换器。测量时，由计算机控制，通过电极转化器，按一定排列方式和次序，自动接通不同位置、不同电极距的电极，获取测线上各个测点不同深度的视电阻率测量资料②。

用高密度电阻率法所测得的数据只能表现地下介质的大致电性变化特征，还必须经过成图反演，才能得到更精确的视电阻率剖面。电阻率成像依其性质可分为两大类：一类是早期的迭代拟合法（如佐迪反演法），且朝非线性全局搜索反演方向发展；另一类是电阻率层析成像法，这种方法是通过测量目标外围的电场数据来获得目标内部电性结构的清晰图像③。

中国科学院地球物理研究所与中国社会科学院考古研究所对河南省商丘市东周时期宋城遗址进行了高密度电阻率法勘探④。工作人员首先分析了商丘古城的埋藏特点，发现该城城墙顶部距现地表深2～4米，墙体深10～12米、宽12～15米。城墙夯土中含有料礓石，城区周围10米范围内主要是第四系泥沙交替的黄河沉积物，具备有利的电阻率测量条件。观测时，布置极距为2～4米，剖面长40～80米，使用20～40根电极。观测仪器是日本OYO公司生产的McOHM－21型高密度电阻率测量仪，该系统由控制台、电极扫描器、电源升压器、电缆以及诸电极组成。系统通过软件、硬件实现多电极、多种观测方式的自动扫描测量。测量方式以二极、三极为主，辅以少数四极测量方式。按此方式，在西、南城墙附近测量了约30条测量剖面，并在城内外观测了多条背景场剖面。对测量数据，用改进的佐迪反演法进行处理，得出比较接近实际的电阻率断面。图6.12是平行于南城墙的视电阻率图，反映了夯土结构的不均匀性。

从观测结果看，夯土层的视电阻率为35～42欧姆米，而同一深度泥土层的视电阻率为15～25欧姆米，说明城墙呈现明显的高阻异常；城墙所在部位，从浅到深

① 高立兵等：《高密度电阻率法在商丘东周城址考古勘探中的应用》，《考古》2004年第7期。

② 蒋宏耀、张立敏：《考古地球物理学》，科学出版社2000年版，第65—66页。

③ 高立兵等：《高密度电阻率法在商丘东周城址考古勘探中的应用》，《考古》2004年第7期。

④ 闫永利等：《高密度电阻率法在考古勘探中的应用》，《物探与化探》1998年第22卷第6期；高立兵等：《高密度电阻率法在商丘东周城址考古勘探中的应用》，《考古》2004年第7期。

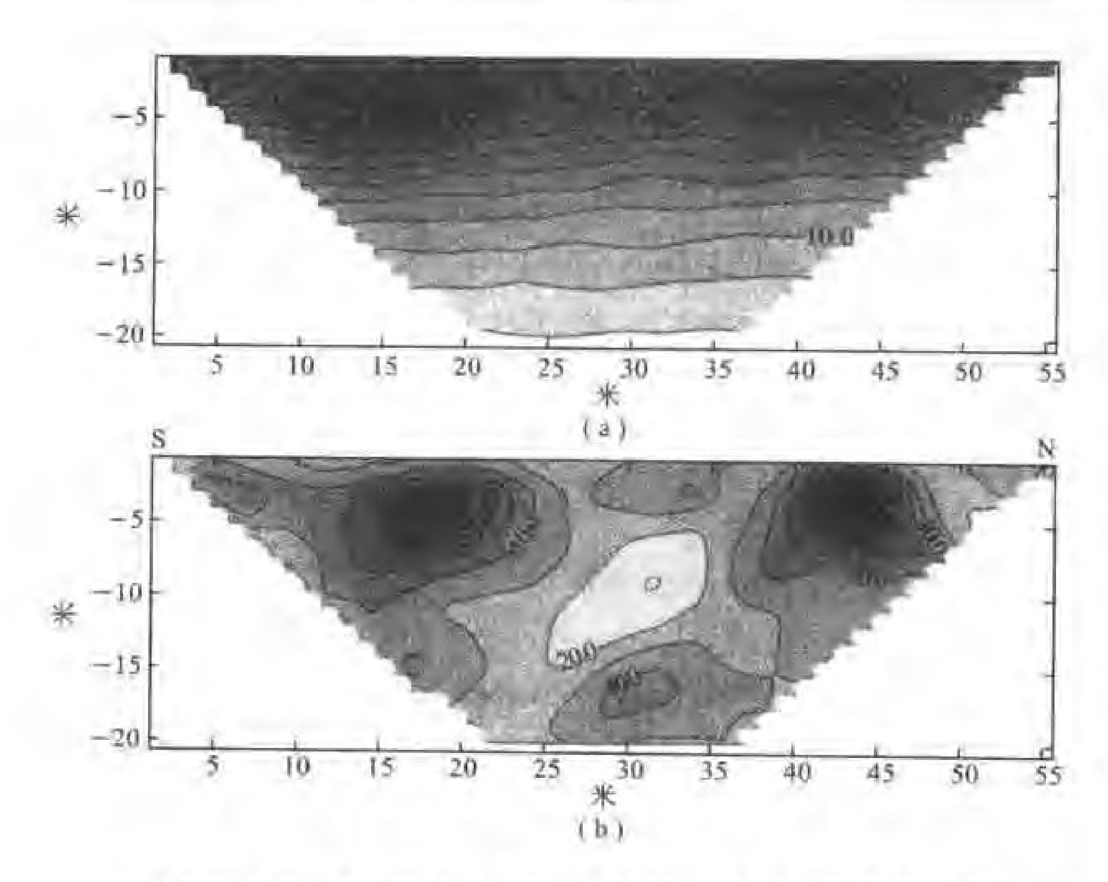


图6.12 平行于东周城址南墙的一条视电阻率灰度等值剖面图

(a) Pole-Pole 方式,24 极,极间距 2.5 米,灰度单位为欧姆米 (b) 改进佐迪法的反演结果

采自高立兵等:《高密度电阻率法在商丘东周城址考古勘探中的应用》,《考古》2004 年第 7 期。

电阻率变化为低—高—低,与考古发掘的城墙断面吻合。但电阻率异常的横向范围大于城墙的宽度,纵向范围小于城墙的埋深,其原因是高电阻率法反映的是地下一定范围内地层电阻率的综合效应。城墙附近和远离城墙的背景剖面,其地电断面特征完全一致。背景剖面上视电阻率随深度由大到小变化,主要反映了地下水含量对地层电阻率的影响。

商丘东周城址古城墙的高密度电阻率法测定结果表明,用高电阻率法探测埋藏相对较浅的城墙,异常反映明显,具有较好的效果。同时还显示,工业干扰对高电阻率法的影响不大,但地下水位的高低对夯土城墙的异常形态影响较大,故选择地下水位较深的季节用高电阻率法探测有利。

（二）磁法勘探

电阻率法受其测量方式的制约而暴露出如测量点稀、分辨率低、费时间等弱点，不适合大面积的勘探。而电磁法的普及和发展，则弥补了这些不足。

磁法勘探简称磁法或磁测，是所有物探技术中应用最广泛的一种方法，主要用于古地磁学、古地理环境、水文勘探、地热勘探等领域。最早是通过勘查岩石和矿物的磁性特征及其差异来寻找矿产的，近20年运用于考古中，能够快速地、较为准确地在考古遗址中寻找到或发现隐藏在地下的城墙、房基、灰坑、窑址、墓葬等对地磁场有一定影响的区域，而且能够判定大范围的遗址区域中文化堆积的所在位置方面，如对新石器时代环壕聚落遗址的调查，可以显示较为完整的遗址结构图。

1．磁法勘探的原理

地球本身具有地磁场，该大地磁场是一个变化极慢的稳定磁场。在包含考古遗存的地层中，除正常的地磁场外，每个考古遗存（即磁性物体）在其自身周围会形成一个磁场，这个磁场叠加于正常的地磁场之上，就会出现地磁异常，磁测要勘探的正是这种磁异常。磁异常主要是探测对象的剩余磁化。剩余磁化指外加磁场去掉后仍保留的磁化方向、强度不可逆的磁化，即永久磁化。它构成物体的固有特性。剩余磁化包括热剩磁（TRM）、沉积剩磁（DRM）、化学剩磁（CRM）、黏滞剩磁（VRM）、等温剩磁（IRM）五种。磁测就是测出磁场的总强度（地磁场＋磁异常）或垂直分量，然后经计算去掉正常场值，即磁异常值＝磁场总强度－地磁场值。

在实际勘探中，主要是通过探测遗迹与周围磁化率的反差来确定磁异常，进而确定考古遗迹的深度、大小、布局等特征。那么，什么是磁化率？物质放入磁场中会发生磁化现象，一般用磁化率表示物质接受磁化的能力。地下遗迹、遗物通过不同方式获得一定的磁化率，而磁化率的大小因文物成因不同而不同，包括文物在生成过程中受所处的磁场强弱、温度高低、压力大小、化学环境影响而从外部获得的磁化率，以及因遗存本身结构中磁性物质的成分、含量、颗粒大小和分布状态所形成的磁化率。

在人类长期生活和居住过的区域中，存在很多遗留物堆积，这些堆积的磁场强度一般要高于那些未受扰动过的区域，根据这一现象就可以大致判断出哪些地区过去曾有人类居住过，哪些地区没有扰动过；就可以初步判断出各地块下面是否有古代文化层的存在。

磁法用于考古勘探中，磁化率会出现正、负异常。前者指磁化率高于周围的磁化率，如含热剩磁物质的遗迹、沟壑、垃圾坑、半地穴式房子、地窖等；后者指的是磁化率比周围磁化率低或者没有磁化率的遗迹，如夯土基址或石结构建筑遗迹。总之，磁法勘探适合填平的土墙、柱洞、道路、居址、灰坑、沟堑等遗迹，以及经过烧烤的瓷窑、砖窑、冶炼窑、炉灶、砖筑建筑和设施等。

2. 遗迹、遗物的磁性

物探中使用较多的是测出遗迹、遗物的热剩余磁性。泥土经过高温焙烧后冷却，甚至经历多次高温烘烧—冷却—高温的循环，在这个过程中，受热运动和大地磁场的作用，它们原材料中的磁性物质的磁畴体积、分布状态、排列方向发生了变化，从而获得了一定的热剩磁。特别是地下铁器、熔铁炉、古代窑址、炉灶、红烧土、居住面在最后一次停烧的冷却过程中，其地磁场被"冻结"在烧土的磁畴中（即永久性热剩磁），成为当时该地磁场的"化石"，它们能使所处的磁强度增大。与此同时，这类文物原材料（主要是黏土）中所含的简单盐类、三氧化物类和次生铝硅酸盐类矿物又发生化学反应，生成新的磁性物质，即伴生化学剩余磁性。

古代遗存在地下合适的周围环境中，也会发生氧化还原反应，使其中的铁氧化物生成新的磁性物质，获得以化学剩磁为主的磁性，如遗址土壤由于被人类利用过、火烧过或有机质的腐烂而使土壤获得较强的化学磁性。

古代井坑、沟渠、居址、文化层、墓葬、古建筑等其中的填充物（如金属、陶瓷、砖、玉石）比天然土壤有较高磁化率，也会导致地磁局部增强，产生天然剩磁。

古城墙、古道路等系碎石、沙砾筑成，因其密度增大、结构变化而使磁化率增大，产生压力剩余磁性。此外，有些夯土原料来自其他地方，与当地土层的磁性有差异，加之夯土中人为地夹杂着陶瓷片、烧土颗粒等磁性物质，这类遗存与周围的介质亦存在磁性差异。

沉积剩余磁性也是寻找古代遗迹的间接信息。地层在缓慢的沉积过程中产生了比较稳定的背景磁场。在这个环境中，任何动土如营造建筑都会引起该处磁场的紊乱。

"勒伯尼效应"很能反映人类活动过的土壤特性。勒伯尼（Le Borgne）发现：从地层的深处到地表，土壤的磁化率由低到高；而人类生活、生产过的遗址区域，从地表到地下 30 厘米之间的地层磁化率比自然地层的磁化率高出 100 倍。"勒伯尼效应"的形成直接与人类活动相关，人类用火和使用、废弃的有机物发酵等活动都可

使磁性较弱的赤铁矿变成磁性较高的赤铁矿。

由于各种古代遗存磁性的形成不同，其获得磁性的方式不同，所显示的磁性也就不同。经过对考古对象的采样测试，可知几种常见考古材料的磁性参数（表6.4）。根据考古对象的磁性及其规模，就可以进行磁法探测。

表 6.4　考古标本的磁性参数

名称	剩余磁化强度 Jr($n\times10^{-6}$SI)	磁化率 K($n\times10^{-6}$SI)	备注
红烧土（瓷窑）	1 220	1 170	宋代古磁窑
红烧土（炼炉）	1 160	6 180	汉代冶铜炉
瓷片	0.3	7 000	北宋古窑址
窑砖	1 340 ~ 7 180	1 630 ~ 3 250	宋代古窑址
墓砖	7 310 ~ 12 900	1 170 ~ 6 220	三国时期墓
窑具	5 220	5 680	宋代古窑址
炼渣	11 200	51 000	汉代冶炼址
工作台	170	10 800	汉代冶炼址
现代砖	1 050	7 030	资料
水泥制品	100 ~ 1 000	100 ~ 1 000	资料
砂土	10 ~ 100	10 ~ 100	资料

采自张寅生：《磁法在田野考古勘探中的应用研究》，《考古》2002 年第 7 期。

3．磁法勘探应用

磁法勘探按其观测领域的不同，可分为卫星磁测、航空磁测、地面磁测、海洋磁测、井中磁测，考古中一般用地面磁测。考古磁测的野外工作法又可分为两类①：一类是在地面用磁力仪寻找地下遗存的地面磁法。英国斯滕内斯立石遗址（Standing Stones of Stenness）就采用此法。另一类是磁化率仪测量表土的磁化率，来寻找表土内遗迹的表土磁测，也称表土磁化率测量，该法可补考古工作之不足。加勒比海的圣卢西亚（St Lucia）用该法排除了较大的磁场干扰，取得了良好的考古

① 蒋宏耀等：《考古地球物理学》，科学出版社 2000 年版，第 23—30 页。

勘查效果。

磁法勘探快捷简便，常见的磁性勘探仪器有高灵敏度的质子磁力仪、光泵磁力仪、磁通量梯度计等。以质子磁力仪为例说明其操作方法（图6.13）。该机配有计



图6.13 磁力仪探测图（本照片由李秀珍提供）

算机系统，只需一人携带主机、探头，按设计路线进行，仪器按指令自动测量和储存。测量结束后经过计算机处理，能很快地找到异常范围和形状。如TGS－2/MP－4型质子磁力仪，内设置电脑程序，与计算机联结，记录整理、数据处理、打印图表等一系列工作可通过电脑进行，其操作简单、仪器轻便①。质子磁力仪虽然具有不怕震动、操作简便等优点，但不能连续进行测量，同时质子磁力仪本身也存在一定缺陷，如抗外界环境的干扰能力差，受太阳日变的影响不能单机使用、数据采集不能自动化、测量精度差、灵敏度低等问题。

光泵磁力仪比质子磁力仪测量精度高，且能连续测量，工作效率更高。总之，磁力仪只能测量特定地区磁场的总强度。但是，考古遗存所造成的磁异常与地球磁场强度相比要小得多，磁异常微弱的遗存甚至被完全掩盖，加之一些人文干扰，

① 张寅生：《磁法在田野考古勘探中的应用研究》，《考古》2002年第7期。

有时仅用磁力仪很难精确探测出考古遗存的磁异常，这个问题依靠梯度仪可以解决。梯度仪测量时，同时使用磁力仪，一个测量固定点的磁场，另一个测量各个测点的磁场；通过比较两者的数值，计算出各个测点同固定点之间场强之差，由此排除各类干扰，准确地测出遗存所产生的磁异常①。

在磁法勘探前要注意：

(1) 首先要选择适当的测点距离和探头高度。考古勘探中，测点间距一般要小于被测对象。测网的比例一般为1:100～1:200。探头高度距离地面1～0.1米。

(2) 周围有无磁干扰，如广播站、铁器（包括运输工具）、建筑物、各种管道都会产生它们自身的磁异常来影响地球表面磁场的变化。

(3) 选择勘探区域时尽量避开含有大量变质岩、火成岩的地区，因为这两种岩石产生的热剩磁会掩盖考古遗存的磁异常。

(4) 区分一些来自宇宙和地质方面的磁干扰。

(5) 由于磁法勘探在某些方面存在局限性，只有与其他物探方法相结合，才能使这一方法更为科学，更为完善。

在河南登封县的一个遗址勘探时，使用了磁法，发现了古窑、古井等多处遗迹②。在约6万平方米的工作面上，工作人员使用质子磁力仪进行了探测，测网比例尺为1:200，探头高度0.5米，观测时间间隔为10秒，测量结果如图6.14所示，古窑、古井的磁异常等值线非常清晰。张寅生用磁法对安徽省霍邱县高塘古堆东汉时期墓葬进行了勘探③，在磁异常区又用电法测量，综合分析的结果经考古验证，误差为4.4%。通过模拟试验、实测分析和考古发掘，磁探要注意：

(1) 磁法测网的密度要依考古对象的磁场强度而定。考古对象的剩余磁场强度（ΔT）值幅度大于背景磁场值（ΔT）70%的，测网可放宽，测点间距为考古对象宽度的1/3左右；ΔT值幅度小于背景场ΔT值30%的，测点间距不大于考古对象宽度的1/4。

(2) 磁测探头的高度选择非常重要。

① 宋宝泉、邵锡惠：《遥感考古学》，中州古籍出版社2000年版，第285页。

② 阎桂林：《考古磁学——磁学在考古中的应用》，《考古》1997年第1期。

③ 张寅生：《磁法在田野考古勘探中的应用研究》，《考古》2002年第7期。

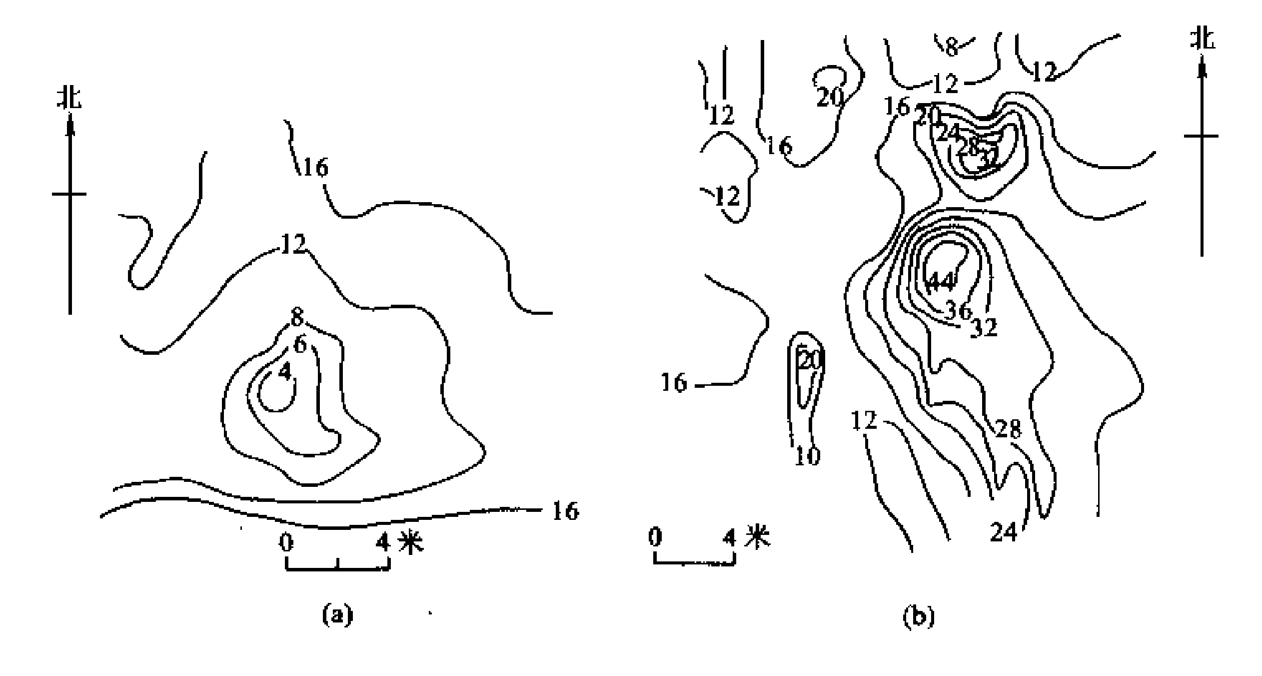


图 6.14 河南登封某古遗址古井、古窑磁异常等值线图

(a) 古井遗存上 ΔT 磁异常等值线图 (b) 古窑遗存上 ΔT 磁异常等值线图

采自阎桂林:《考古磁学——磁学在考古中的应用》,《考古》1997 年第 1 期。

(3) 剩余磁场强度(ΔT)是磁测中较为合适的参数选择。

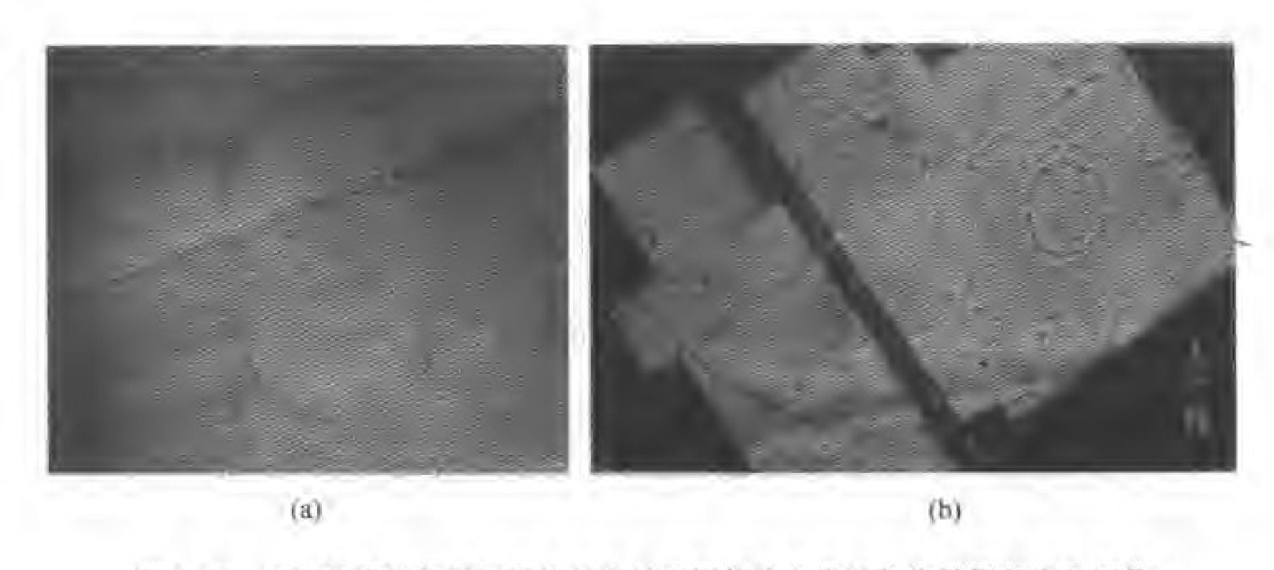
(4) 采用化极、求导、梯度、位场延拓等方法进行磁场数据处理和异常转换,有效地修正、辨别、消除了干扰异常。

(5) 在勘探中,多方法应用、多参数解释十分有效,而每种方法要根据考古对象的地物特性和待解决的问题而定。

1988 年,德国的贝克等人对麦斯特恩塔尔(Meisternthal)的椭圆形沟堑进行了磁法勘探①。该遗址早在 1980 年首次被彩红外摄影拍摄,该航片显示明显的土壤标志。椭圆形的沟堑轮廓清晰,但是航片的分析尚无法解决该遗址的出入口及其多少、遗址的性质等问题。磁法勘探从 1988 年 9 月到 1992 年 10 月,勘探面积 6 公顷,共测 240 000 个测点,测点间距为 0.5 米。探测结果与航片一致且补充了前者。图 6.15 为 1 公顷的探测面积,布 20 米 × 20 米的探方 25 个。椭圆形沟堑

① 宋宝泉、邵锡惠:《遥感考古学》,中州古籍出版社 2000 年版,第 290—291 页。

(46 米×37 米)在图像上是深灰色和黑色，其东西两侧各有一小间断，当为该遗址的出入口，且刚好位于东西短轴上。东出入口的方位角为91°，它与西出入口精确地标示出春分和秋分(3月21日和9月23日)时节日出、日落的位置，古代先民可能就是这样记录农耕和收割两个重要日期。在椭圆形遗址外，贝克还探测出一个比较完整的木栅栏围墙(这个围墙的部分地段在航片的土壤标志上隐约可见)，其东西长230米，南北宽160米，在西北和东南还分设两出入口。1993年，对沟堑的局部发掘表明该遗址时代为新石器时代中期。贝克进一步推测，椭圆形遗址为新石器时代先民观测和祭祀太阳的场所。



(a) (b)

图6.15 麦斯特恩塔尔椭圆形沟堑遗址摄影像片和磁法物探数据数字化图像
(a) 摄影像片(1980年摄) (b) 磁法物探数据数字化图像

(三) 电磁勘探法与探地雷达

电磁勘探法的基本原理是电磁感应和电磁波在传播过程中的折射、反射和衰减，主要测出考古遗存与周围土壤的电阻率和磁化率异常。使用电磁探测仪时由发射线圈向地下发射电磁波，使之产生二次电磁波，再返回到地面被接收圈感应，如有次极磁场即发出电压信号。在发射信号低频时(约4千赫)磁化率是主要的，在高频时(约100千赫)电阻率是主要的。电磁法的电源大多都不接地，可在接地条件差的地区使用。但是，电磁法有个明显的缺点，其勘探深度不超过1米，而且地表电性的不均匀会严重影响测量结果。

目前，在考古探测中，用得最多的电磁法是探地雷达。探地雷达（Ground Penetrating Radar 或 Ground - Probing Radar，GPR）是一种测定地下介质分布的光谱（1 兆赫～1 吉赫）电磁技术。在考古中，是通过探测地下介质电性（主要是介电常数、导电率）的差异，了解遗迹遗物情况的一种方法。

探地雷达利用一个天线发射高频电磁波，另一个天线接收来自地下物质界面的反射波。电磁波在物质中传播时，其路径、电磁场强度与波形随通过物质的电性质及几何形态而变化，因此根据接收到的波的旅行时间、幅度和同相轴（相邻波中相位相同的点）特征，便可推断介质的结构和地层的起伏形态，进而推断出考古遗存的分布①。野外操作时只需按规则移动雷达天线，其图像便以脉冲波的波形形式记录在计算机上，通过计算机处理很快能得出准确的结果，确定遗迹的地下位置（图 6.16）。

雷达剖面特征分为波形和异常形态两类。波形特征依据振幅、波长、形态等特征来识别异常。就发射波的能量而言，金属体比非金属体异常明显，非金属体不充水比充满水者异常明显。在异常形态方面，当目标体相对测量装置可视为点状体时，异常呈典型的双曲线型；城墙等线性遗迹，在测线垂直其分布走向时，异常也多为双曲线型。长轴状的比球形的异常明显。

探地雷达勘探时，首先要对考古遗存及其环境进行分析，搞清其埋深、几何形态、电性特征、文化层性质等，以便决定使用合适的雷达探测。接着，建立测区的坐标，根据工作频率、天线间距、采样间隔、采样时窗、测点间距、测网、天线方向等设计合适的探测方案。然后，进行探测。如果考古遗迹走向已知时，沿遗迹走向垂直布测；如考古遗迹方向未知，宜采用方格网布测。测量采用剖面法，发射天线和接收天线以固定间距沿测线同步移动，移动一次，便获得一条脉冲发射波记录，一个个发射波组成的时间剖面就是整条测线的记录。之后，对测量的数据进行数字处理、图像增强，旨在压制干扰、增强信号、获得准确的地下信息。最后，对遗迹、遗物的雷达图像异常进行考古学解释。

1996 年 3 月，工作人员对唐大明宫含元殿遗址进行探地雷达探测②。含元殿

---

① 高立兵：《探地雷达在考古勘探中的应用》，《中国文物报》1996 年 6 月 23 日第 3 版；高立兵：《地面透射雷达（GPR）及其在考古勘探中的应用》，《考古》2000 年第 8 期。

② 高立兵：《地面透射雷达（GPR）及其在考古勘探中的应用》，《考古》2000 年第 8 期。

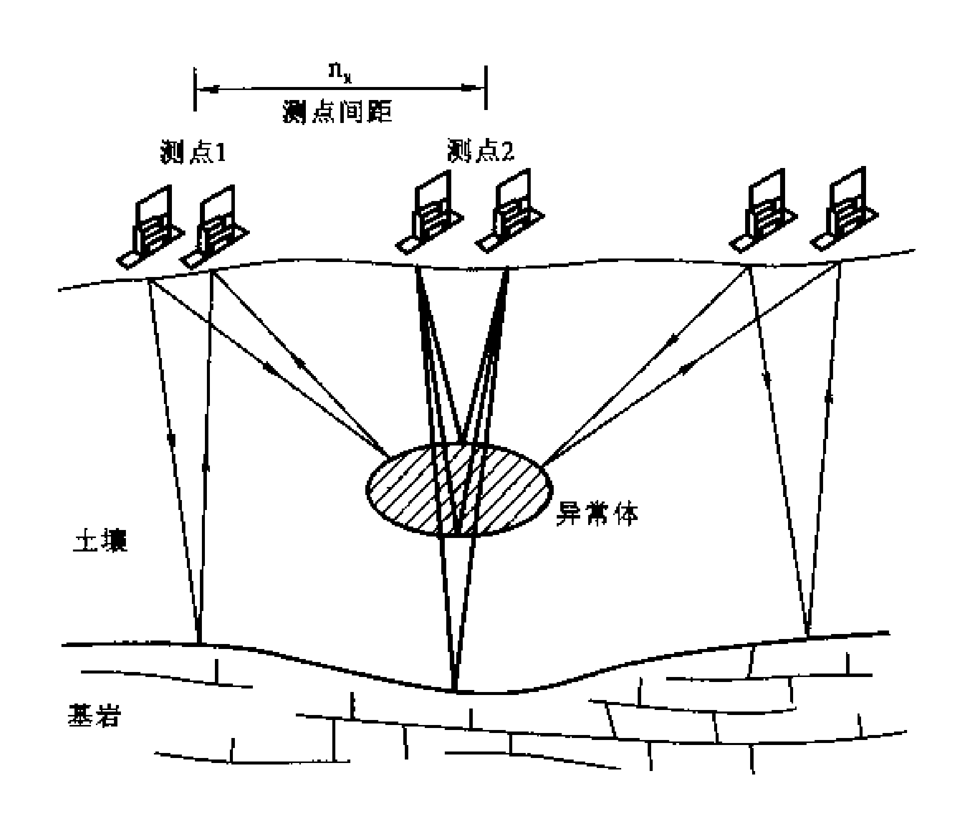


图 6.16　探地雷达野外工作示意图

基址是建在一个小山丘上的夯土台基，最高处与地平面高差 15 米左右，经上千年的破坏，遗址目前已残破不堪，现存殿址和两侧阁址地面已低于当时地表，不能再进行发掘。所以，考古人员选择 GPR 技术作为无损探测手段，以帮助了解含元殿的承础石分布情况。

含元殿殿基为黄土夯筑，现存夯土厚 5 米，夯土台的东、西、北壁露出夹筑在夯土里的承础石，这些石块都在同一水平面，距离夯土最高处 1.8 米。工作人员根据承础石的分布特征用 GPR 对殿阶进行探测。选用 pulse EKKO 1000 型雷达系统，配备 225 兆赫天线，天线固定间距 0.5 米。采样间隔 500 皮秒，采样时窗 110 纳秒。经过实验分析，该遗址干燥、密实夯土的电磁波为 0.08 纳秒每米，这样的设计大致反映 4 米深，是承础石埋深的 2 ~ 3 倍。测线沿东西向布置，间距 1 米，覆盖整个夯土台基面，以便寻找承础石。在殿址两侧布设南北向测线，以了解散水的分布。

探测成像后的雷达图像如图 6.17 所示。图 6.17(a) 是承础石的典型雷达图像，图像上波形表现为双曲线异常，这是由承础石引起的。图 6.17(b) 是阶基西壁

下散水的雷达图像，同相轴异常反映了散水砖面的倾斜情况。

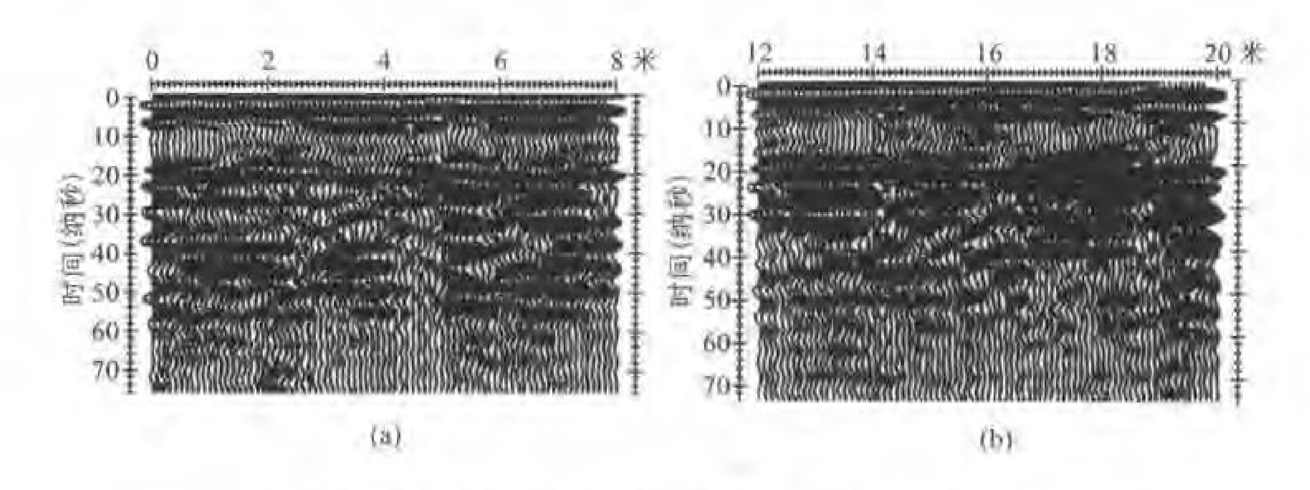


图6.17　含元殿遗址中承础石和阶基西壁下散水的雷达图像

(a) 含元殿遗址中承础石的典型雷达图像　　(b) 含元殿阶基西壁下散水的雷达图像

采自高立兵：《地面透射雷达(GPR)及其在考古勘探中的应用》，《考古》2000年第8期。

我国科技工作者因地制宜，灵活地运用探地雷达对绍兴印山大墓葬作了无损探查[①]。探测是基于发掘该墓已数月，仍未见墓室；其目的主要是查清墓室的范围与形状，以便进一步的发掘。工作时，使用脉冲雷达(EEKO IV)和调频三角波雷达，雷达频率采用100兆赫、400兆赫，宽带行波天线，收发天线间距1米，移动点距是0.2米。探测共布置东西向移动测线2条，南北向7条(图6.18)，在测线7、8的剖面位置上每个测点连续采样10次，用时间相关方法提高接收信噪比，以提高探测准确性。为提高测线至信度，在测线2剖面上加做瑞利波(声波)探测(COD)。考古人员分析该地区地下水水位高、土壤潮湿，因而电磁波被地下水大量吸收而无法深入地下，回波信号幅度小、信噪比低而影响探测深度。此外，探地雷达的探测电磁脉冲经地层传输后会变宽，致使回波脉无法被正确识别。所以，在后期的数据处理中引入了地理信息，综合长江下游石室土墩墓的特征，以及电磁波在地下传播的特点，对地下目标的反射特性参数作聚类处理，用图像处理技术做出

① 姚菡等：《绍兴印山大墓GPR无损探测方法研究》，《科技考古论丛》(第2辑)，中国科学技术大学出版社2000年版，第116—121页。

地下异常剖面图。后来的发掘证实,其结果误差不超过1米。

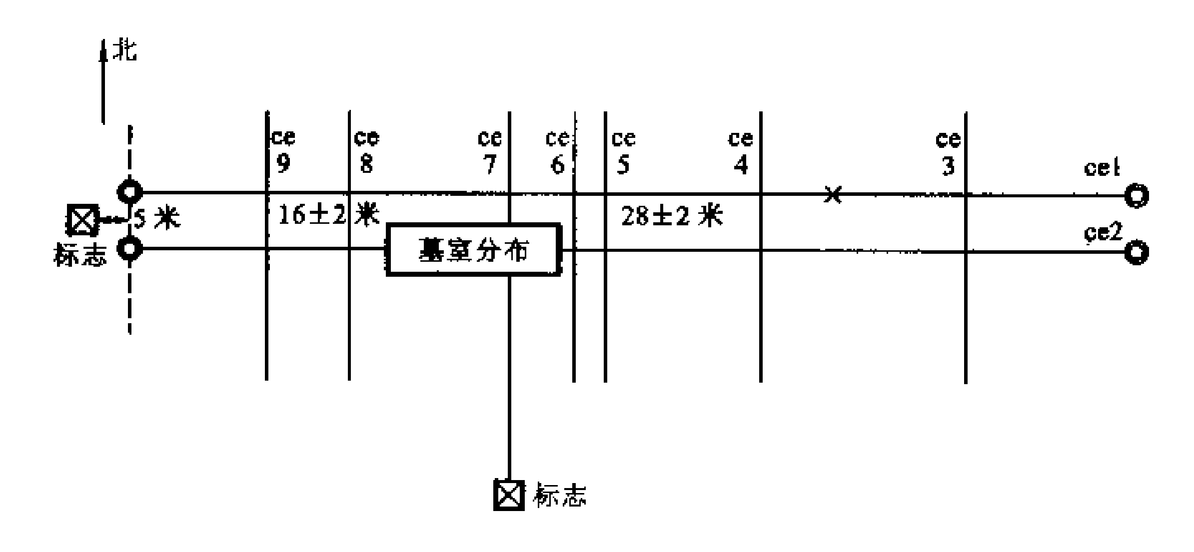


图6.18 印山大墓墓室分布平面示意图

采自姚萌等:《绍兴印山大墓GPR无损探测方法研究》,《科技考古论丛》(第2辑),中国科学技术大学出版社2000年版。

据奥新社报道,奥地利考古勘探队运用雷达技术发现了一座名为卡农图姆的古罗马城市。他们首先通过空中照片和地面电阻测量获得了广场位置的初步线索。之后用雷达对方圆3公顷,深达3.2米的地层每隔10厘米逐层扫描,从扫描图像上可清楚地分辨出地基、墙壁、黏土或砖石铺设的地面、台阶、街道和排水渠,利用这些信息在计算机上通过一种考古复原模型软件制作出广场的三维图像。古罗马城的考古调查,用探地雷达探清了城墙、地面等石质建筑,又用磁测法寻找到壕沟、坑、柱洞、砖墙、瓦以及供暖设施。

经过对夯土、墓葬等用GPR探测实践说明:

(1) 由于采用了宽频短脉冲和高采样率,GPR分辨率较其他物质手段高,最高可达数厘米;面且探测深度可达30~50米。

(2) 由于GPR的数据采集和图像显示同步进行,所以可以根据实地情况调整探测参数和观测方式,以获得最佳的探测效果。

(3) GPR的适合对象是大型的夯土基址、城墙、建筑遗迹、晚期的砖石结构墓葬,而且GPR适合在已知的范围内进行详查,无法像其他物探在未知区域寻找遗存。

(4) GPR易受低阻介质的影响，遗迹和遗物的物性差异不是很大，特别是不同地区、不同时期的夯土及其保存环境不同，这些都影响了GPR的勘探效果。

(四) 地震勘探法

地震勘探法又称弹性波法，是由人工产生的地震波传到地下，遇到介质后经反射或折射再传回地面，根据传回地面的地震波特征来判断介质的形状、大小、埋藏深度等。按照地震波在介质中遇界面时出现的现象，可以分为折射波法、反射波法、透射波法、面波法。在考古勘探中一般用折射波法、面波法。

地震勘探所用的观测仪器主要包括四个方面，其一是震源设备，用来产生地震波；二是检波器，以接收地震波并将振动能转化为电能；三是放大器，放大微弱信号；四是记录器，记录和处理多方面信息。

地震勘探法分辨率高，勘探的精度较高，可以比较准确地提供探测目标的形状、大小和深度等信息，但由于其仪器设备复杂等原因在考古中应用得不多。

在探寻罗马圆形大剧场石柱的探测中，使用了地震勘探法。大剧场整体呈椭圆形，结构类似现代运动场，建筑工程采用拱券，一、二、三层都是古典柱式拱廊。现在部分结构尚完整，但石质墙、柱的保存状态及风化状况不清，这直接关系到大剧场的保护问题。由于弹性波在石头中的传播速度与石头的类型、孔隙、破裂、风化程度等状态有关，所以测量弹性波在墙、柱中的传播速度就可得到有关的状况信息。此次探测的震源是在柱面上放一块金属板，用2公斤的锤子敲击金属板以产生振动。柱子尺寸为230×330厘米，有4个面，在3个面上各置4个检波器，在第四个面上和其他三面的检波器之间设置12个激发点。这样，每个柱子有144条射线，由这些射线可测得弹性波在柱体中的传播速度。总共测量了4个柱子，其中53号柱子的平均波速为2.7km/s，是四个柱子中波速最高的一个。在柱子里，波速最高的部分位于柱子内侧，外侧波速较低，反映了柱子外侧的风化程度较大些①。

在国家“863”计划秦始皇陵园的物探考古中，使用了弹性波法和其他7种方法，取得了重大进展。在这次工作中，分析了过去弹性波法的使用状况。以往的弹性波法是在地下打一个钻眼，然后往里面填充炸药进行适当爆破，制造震源从而产生弹性波。为保护地下文物，对秦始皇陵园的弹性波法不能使用炸药，震源选用夯

① Bernabini M, Cancanieccia M, Cardarelli E. Seismic Survey of Some Pillars of Coliseum. In: Archaeometry '90: Proceedings of the 27th Symposium on Archaeometry. Basel: Birkhau-ser Verlag, 1991: 677-686.

土震源。离开夯土震源点20米,就不会感觉到震动。为此,专门从德国引进了机械震源,通过这一震源向地下发送弹性波。结果显示,地宫周围的考古现象与墓葬开挖后引起的弹性波法的反射异常、重力异常、夯土墙的磁异常、墓室的高电阻异常和汞异常等诸种物探异常共存,说明地宫是存在的①。

第三节　地球化学勘探

地球化学勘探法是根据勘查目标的主要元素及其伴生矿物的主要元素,在某个地区有限范围内的岩石、土壤、水、空气、植物等介质中的丰度,比周围地区高低的异常来寻找勘查目标的②。原则上,各种地球化学勘探技术都可以用于考古学上。目前,地球化学勘探法在考古学上只有零星的使用,有待发展。此举二例进行说明。

一、汞测试

汞测试指通过测试汞元素的化学异常来寻找地下遗迹。汞或汞的化合物埋在土中,缓慢而又不间断地向地表散发汞蒸气,这种蒸气在上升过程中会发生各种化学、物理反应,当汞与尸体或其他有机物中的甲基团、苯基团、甲氧基团结合时也会产生有机汞化合物。而且,汞的穿透能力极强,可以从地下深处向上穿透岩石、混凝土、土壤等介质而到达地表。在穿透的过程中,不同的介质会对汞蒸气产生吸附作用,当吸附介质与汞不发生化学反应时产生物理吸附,当介质与汞起化学反应时则形成汞的化合物。根据这些特征,我们可以推断特定区域汞的异常。

古代人早已懂得如何使用汞或汞的化合物。汞即水银,考古中常见汞的化合物是朱砂。在新石器时代,古人即将朱砂作为颜料、染料用,把它涂抹在器物上,也知道朱砂有防腐功能,将之涂抹在尸体上。不过,此时期的朱砂使用毕竟有限。到了商代,考古发现许多墓葬中的棺板周围被涂撒朱砂,但相对而言,汞的使用仍然较少,而且只在大中型墓中才有。这样,在古代的遗迹中往往会有汞或汞的化合物,当汞蒸气上升到地面土壤时,便保存在土壤孔隙中,形成气汞异常;而汞蒸气在

① 段清波:《秦始皇帝陵的物探考古调查——“863”计划秦始皇陵物探考古进展情况的报告》,《西北大学学报》(哲学社会科学版)2005年第1期。

② 蒋宏耀、张立敏:《考古地球物理学》,科学出版社2000年版,第179页。

上升的过程中也会被土壤吸附,形成土壤汞。只要测量出土壤中的气汞含量或土壤汞含量,进而分析遗迹含汞量与周围含汞量的异常,就能勘探遗迹的范围等情况。此外,自然成因也会导致汞异常,这样就需要进行汞热释谱的测量。汞热释谱指汞化合物在加温过程中连续释放的汞瞬时浓度随温度的分布曲线。不同的汞化合物,它们的热释谱不同,由此可以区分不同的汞化合物。

气汞异常的测量目前采用金汞齐采样技术。在采样点位上用钢钎打孔,将采样器拧入孔内,用大气采样器或抽气筒抽取孔里的汞蒸气;汞蒸气经除尘过滤去处杂质后由硅胶管导入金丝捕汞管,金丝与汞蒸气化合形成金汞齐。最后,在实验室加热金汞齐,放出汞蒸气,即可进行测量。土壤汞量测量采样亦是用钢钎打孔,再在孔底用土壤采样器采样。目前汞的测试方法有:比色分析法、光谱分析法、原子荧光法和原子吸收法。

1985 年和 1987 年,用汞测量法对安阳殷墟进行勘查①。1985 年,用土壤汞测量法对宫殿遗址区、贵族墓葬区、未发掘的贵族墓葬区、平民墓葬区进行了探查。土壤样品采自地下 1.5 ~2 米,测定采用原子吸收法。勘查的结果如图 6.19 所示,安阳市土壤汞背景值为不到 50×10^{-9},而殷墟保护区的土壤汞量为 600×10^{-9}。不仅如此,殷墟保护区内的土壤汞含量也不一致,平民墓葬区的土壤汞量平均为 120×10^{-9}, 贵族墓葬区的土壤汞含量是 350×10^{-9}, 未发掘贵族墓葬区的土壤汞含量更高,平均值为 $1\ 500 \times 10^{-9}$,最高值近 $16\ 000 \times 10^{-9}$;宫殿遗址区的土壤汞含

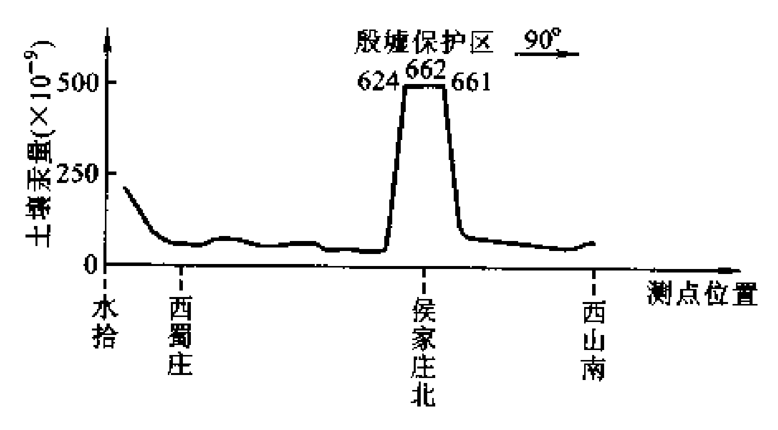


图 6.19 安阳地球化学勘查剖面土壤汞含量曲线图
转采自伍宗华等:《汞的勘查地球化学》,地质出版社 1994 年版。

① 申斌、边德芳:《应用物化探方法研究殷墟遗址》,《华夏考古》1988 年第 2 期。

量最高，平均为 $3\ 300\times10^{-9}$，最高值近 $16\ 400\times10^{-9}$。测量的结果说明：殷墟土壤汞含量异常高，贵族墓葬区的汞异常与商代贵族大量使用汞和朱砂有关，宫殿遗址区的汞异常也许与其中的包含物中使用朱砂等相关。

1987 年，工作人员又对殷墟王陵区、宫殿区进行汞测试。这次的任务是排除自然因素汞异常的干扰，寻找该地区汞异常的源头。工作人员首先分析了汞异常是否与自然矿化有关，他们用原子荧光法分析了该地区砷、锑、铋元素的含量，确定它们与汞含量的变化无关。另外，他们还调查了该地区的地理、地貌以及有无工业污染，发现这些因素均无，说明汞异常只能是地下文物所致。在此基础上，他们用热释汞法测量王陵区、宫殿区，结果如图 6.20(a)、图 6.20(b)，王陵区已发掘的大墓、宫殿区已知的遗址处与汞异常高相对应；此外，他们还作了电磁法测量，所发现的异常与热释汞异常基本一致。

我国用此法对秦始皇陵的地宫进行了探测，证明是可行的。秦始皇陵的地宫到底在何处，结合文献记载地宫内"以水银为百川江河大海，机相灌输，上具天文，下具地理"(《史记·秦始皇本纪》)，1981 年对秦始皇陵 125 000 多平方米封土进行汞测定①。结果发现在其中约 12 000 平方米范围内，汞含量异常(图 6.21)，集中在秦陵内城中央地区，而且汞异常有一定规律，可能是地宫所在处，也可能是地宫内大量水银长期挥发渗透的结果。可见，秦始皇以水银为江河大海，不仅营造了壮观的自然景观，而且可以使尸骨、陪葬品不腐，还可以毒死盗墓者。

二、磷酸盐勘探法②

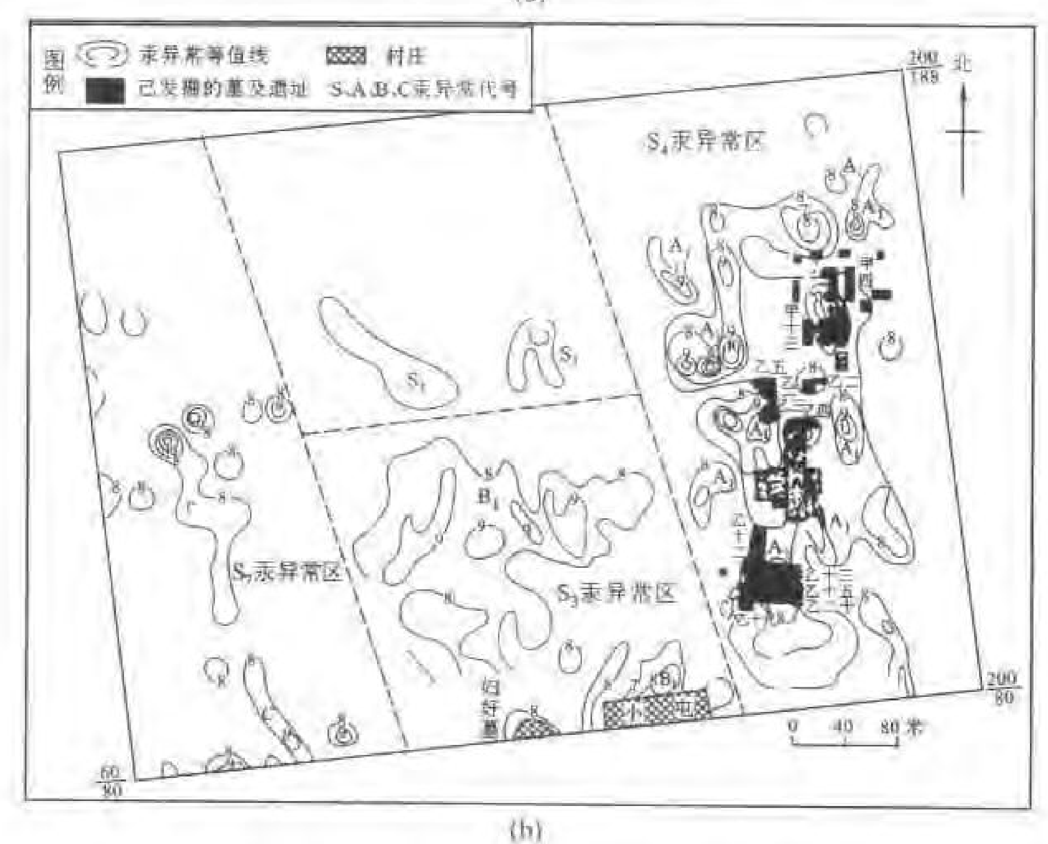
磷是所有动植物及其环境中的一种基本元素，在自然界中循环存在。它从土壤到植物，从植物到动物，再由动物返还到土壤，在一定区域内的这种磷循环保持常量。当某一地区垃圾、动植物遗骸及排泄物集中沉积时，该区所含的磷酸盐就多；如果从某地区将含磷物质移开则磷酸盐含量下降。但是，磷酸盐的土壤溶解度特低，所以任何局部地区的磷过剩或不足会长期存在。也就是说，凡人类生活过的地方都会有富含磷酸盐的有机垃圾。因此，可以借助于系统地测量某一区域中磷酸盐的含量，寻得其反常地区从而找到古人类的活动区域。

① 伍宗华等：《汞的勘查地球化学》，地质出版社 1994 年版。

② 李士、秦广雍：《现代实验技术在考古学中的应用》，科学出版社 1991 年版，第 338—340 页。



(a)



(b)

图 6.20 殷墟王陵区、宫殿区热释汞异常图

(a) 殷墟王陵区 (b) 宫殿区

采自申斌、边德芳:《应用物化探方法研究殷墟遗址》,《华夏考古》1988 年第 2 期。

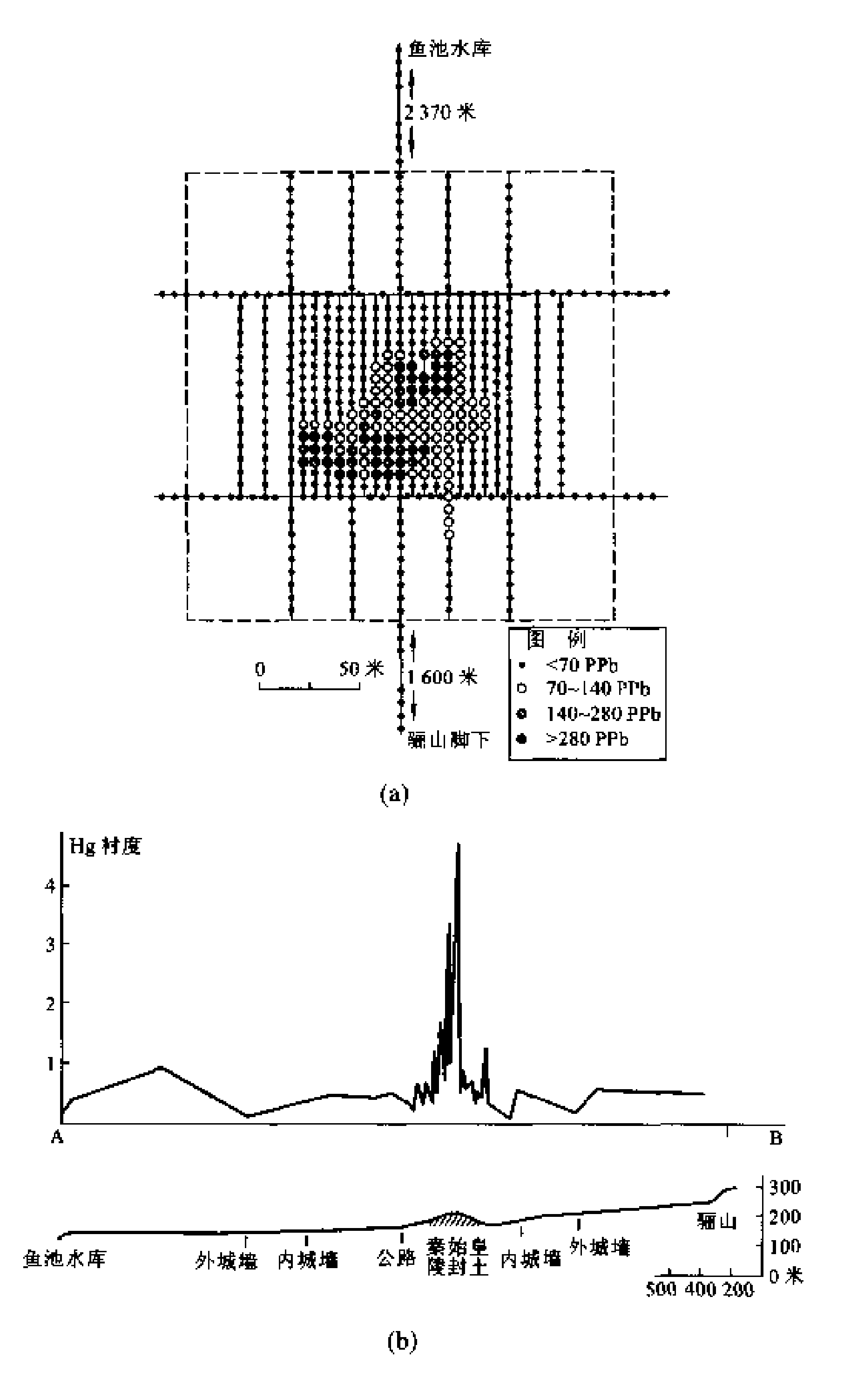


图 6.21　秦始皇陵区土壤测汞点含汞量图

(a) 秦始皇陵采土测汞点及各点含汞量　(b) 骊山至鱼池测汞点上土壤中含汞量变化图

采自袁仲一:《秦始皇陵考古发现与研究》,陕西人民出版社 2002 年版。

1986年，英国遗物中心发掘队在调查德文郡代顿史前遗址时，用地磁法和磷酸盐法进行调查。该地的地表下为石灰岩，通过采集表土中的磁化率和磷酸盐样品，测定之后发现前者反映的磁化异常与考古遗迹不符，而遗迹所处位置的磷酸盐明显偏高①。

从磁化率和磷酸盐分布阴影图（图6.22）中可见，该遗址东南部有一圆形房基，

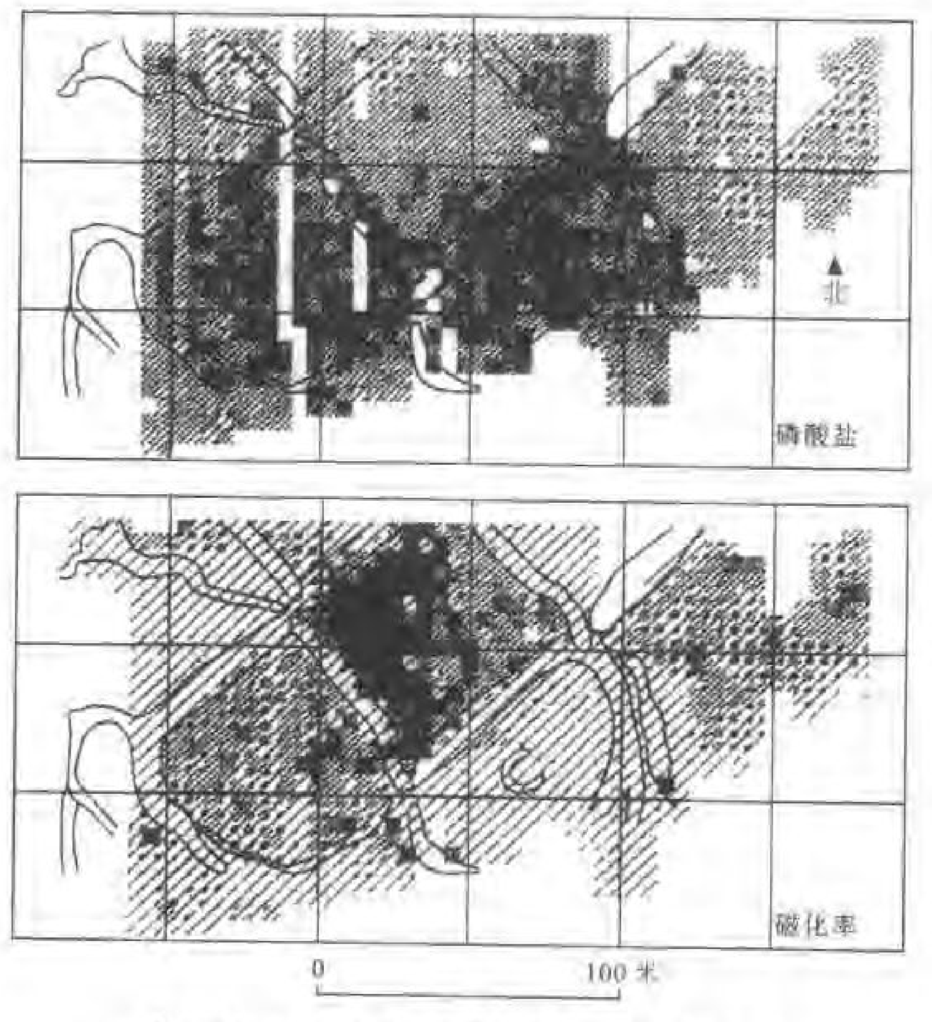


图6.22　代顿史前田地磷酸盐及磁化率分布图

采自　Clark A J. Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology. London: B. T. Batsford Ltd., 1990.

① Clark A J. Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology. London: B. T. Batsford Ltd., 1990.

但该处的磁化率值水平却较低；而磁化率值最高的北部中间部分，经发掘并无任何特别发现。经过对地里的外来石头分析，发现磁化率高的地方杂乱地堆放着小块的、火烧粗晶玄武岩，这可能是该处磁化率值高的原因。而磷酸盐分布阴影图中，这几块地的磷酸盐水平相当高，特别是南面两块地更高，其中包括圆形房基所在。这为考古遗迹的解释提供了必要的信息。

磷酸盐勘探法是国外处于探索阶段的方法之一，但因采集取样程序多，分析过程长而未被广泛推广。

第四节　GPS、GIS 在考古调查中的应用

当考古工作者把调查结果填写在调查登记表上时，意味着野外调查工作基本结束。当然，对于内涵比较丰富的遗址，一张表格可能无法充分地反映遗存概况，还要作详细的文字记录补充。在此基础上，还需要做进一步的室内整理工作，才能得出比较详尽的调查结论和工作总结。

以上是传统的调查总结方式，这种方式大致表示出特定区域内各种遗存的时空分布。但是，传统的调查受调查范围和分析手段的限制，很难处理不同时空范围新发现的资料与已知的多项因素的各种复杂关系。众所周知，古代遗存的分布错综复杂，既具有不同的物理特性，又通过一定的文化模式互相联系。在这种情况下，特别是随着各种科技调查手段的提高而获得更多的信息量时，传统的研究方法很难将一个很大很深的时空范围内的所有复杂多样的资料进行对比、整合处理，并揭示出其内在的划分和联系，更无法提供不同文化时期遗址空间的分布及其连续性。GPS 和 GIS 技术为这种深层内在的研究提供了时空研究的工具。

GPS、GIS 用于考古学研究中具有如下功能：

(1) 其对数据的分析是一个可重复的、无损的考古信息的利用。它们记录已探测和正在探测的遗存的保存、破坏状况，借助于各种数据库，输入相关的考古信息，利用计算机建立若干可视的遗址完整结构图。

(2) 为考古学文化资源管理提供了方便的遗址定位模式。从特定区域的已知遗址数据库中进行 GIS 分析，看看这些遗址具有何种特征，有无规律性以及地下分层结构，然后分析该区域哪些地方也具有同样特征，再去这些地点进行寻找。这种

方法往往很有效,甚至可对未发现遗址的特点做出比较确切的预测①。

(3) 对考古资料进行空间意义上的分析,过去我们习惯于讲某一文化的连续、演变。应用 GIS、GPS 技术,我们可以从世界范围、区域范围内多因素地分析考古资料,可以了解特定空间内的遗存组成、特征及其周围的联系。

(4) 可以加深理解物质遗存所反映的人类行为的具体的时空特征,通过对某一范围内遗存的所有资料进行分析获得一些规律,并建立模式,应用这些模式与更大范围内的其他遗存比较,并且透析出人类行为的特点。例如,1982 年,美国学者格林(S. W. Green)用 GIS 手段对欧洲爱尔兰岛南部的 300 多个史前遗址进行调查和试掘,搞清了该区域各时期遗址的空间分布,建立起这一区域的文化序列,同时对各时期各个遗址的性质、聚落模式等问题进行了推测②。

一、运用 GPS 确定遗址的地理坐标

GPS 是全球定位系统(Global Positioning System)的简称。GPS 的发明是美国出于军事的目的,现在则广泛应用于民用工业,也为军方服务。它是一种世界范围内的导航和定位系统,是建立在无线电定位系统、导航系统和定时系统基础上的空间导航系统。在考古学中,应用 GPS 可以确定各个遗址的经度、纬度、海拔高度等地理坐标。

(一) GPS 的工作原理

GPS 以距离为基本观测量,通过同时对多颗卫星进行伪距离测量来计算接收机的位置③。GPS 具有全能性(陆地、海洋、航空、航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位功能。它由空间导航卫星、地面监控站组和用户设备三部分组成(图 6.23)。空间的 24 颗 GPS 卫星(其中 21 颗工作卫星,3 颗备用)均匀分布在 6 个轨道面上,轨道的平均高度为 20 200 公里,卫星的轨道非常严格,如有误差,可以得到地面监视系统的即时更正。GPS 的时空配置,可以保证在地球上的任何地点、任何时刻均至少可同时观测到 4 颗卫星,以保证精密导航和定位的需要。监控

---

① 曹兵武:《GIS 与考古学》,《考古与文物》1997 年第 4 期。

② 中国河南省文物考古研究所、美国密苏里州立大学人类学系:《河南颍河上游考古调查中运用 GPS 与 GIS 的初步报告》,《华夏考古》1998 年第 1 期。

③ 陆守一等:《地理信息系统实用教程》,中国林业出版社 2000 年版,第 199 页。

系统跟踪观测GPS卫星、计算编制卫星星历、提供GPS的时间基准、监测控制卫星的运行情况、调整偏轨卫星，注入导航和控制指令、启用备用卫星替代失效者。GPS接收设备由GPS接收机硬件和相应软件、计算机处理机和终端设备组成，它们可置于地球的任何位置，但接收仪所在地必须能接收并处理3颗以上卫星的读数；每日24小时接收利用定位卫星提供信号得到的位置（经度、纬度、海拔高度）、时间、运动方向、速度等信息。

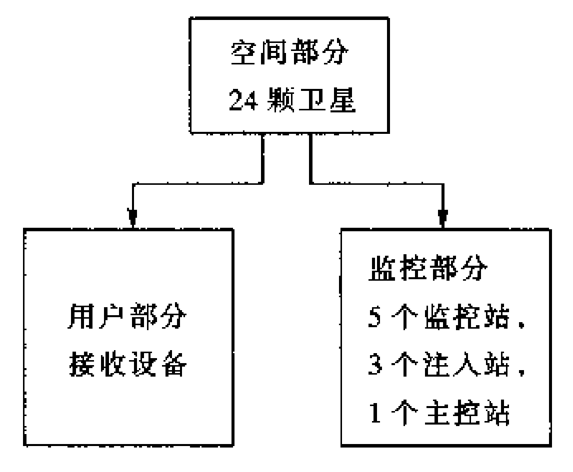


图6.23　GPS组成结构示意图

GPS定位系统属于无线电导航定位系统，用户通过接收设备接受卫星发播的信号，就能测出卫星信号的传播时间延迟或相位延迟，解算接收机到GPS卫星间的距离（伪距），确定接收机位置及时间改正数。

（二）GPS在考古中的应用

GPS技术用于考古学上已有近二十年的历史，从实践中科技考古工作者已开发出相应的软件程序，摸索出应用GPS的有效方法。GPS技术用于田野考古具有一些优点：

（1）高精度的三维定位，各点不存在误差积累。

（2）设计和布点方便灵活。GPS的定位精度与GPS点的几何图形基本无关，不受地面点间相互通视的限制。

（3）对地理条件和作业条件要求低，高山、沙漠、孤岛、礁滩都可进行工作。

（4）不受气象条件的限制，工作效率高①。

GPS现在主要用于航空摄影测量，目前GPS技术已由动态定位技术飞速发展到GPS辅助航空摄影测量技术。GPS天线一般安装在飞机顶部，航摄仪则安装在飞机底部。摄影测量利用摄影像片来研究、确定被摄物体形状、大小、位置及属性的相互关系，主要是以航摄像片所量测的像点坐标为基础，用计算方法解求加密点的地面坐标。GPS辅助航空摄影测量技术具有速度快、精度高的特点。具体说，

① 刘建国：《3S在考古领域的应用与研究》，《青年考古学家》总第12期，2000年。

GPS 辅助航空摄影测量技术主要指 GPS 辅助空中三角测量，是用飞机上装配的一台 GPS 信号接收机和地面上的一个或多个基准站上的 GPS 信号接收机同时连续地观测 GPS 卫星信号，经差分 GPS 地离线数据处理得出航摄仪曝光时刻摄站的三维坐标，再将其作为附加观测值引进摄影测量区域网平差中，最后用统一的数学模型等计算确定点位。GPS 辅助航空摄影测量技术应用于航空遥感探测系统中，能迅速地测量出遗迹的分布范围、各遗迹的大致轮廓及其相互间的关系。

GPS 技术在水下考古中的前景也很看好，目前 GPS 接收机已与水声仪器、计算机、绘图仪组成水下地形测量自动化系统。如美国的 IMC 公司生产的 Hydrol 型自动定位系统，野外有两人便可完成岸上和船上的全部操作，当天所测数据 1～2 小时可处理完毕，并即时绘出水深图、测线断面图、水下地形模型等①。GPS 技术应用于水下探测将提高水下勘查的效果和速度，我们期待着 GPS 技术与水下考古新的结合。

但是，应用 GPS 技术只能得到宏观的结果，而且测量技术有一定的缺陷；GPS 技术也会产生误差，它与接收地点所在位置、大气层的变化、定位仪的功能及其他因素有关。所以，实际操作中往往是 GPS 技术与各种地面物探、航空遥感、水下探测手段相结合、相参考。例如我国颍河上游的经验表明 GPS 在探孔与探孔接收的数据之差与测绳量的距离之差成正比，测绳量的距离与 GPS 数据基本上是重复的；2 000 个 GPS 平均值与 4 000 个 GPS 平均值误差仅为 0.01，2 000 个 GPS 的平均值更为有效；GPS 的位置尽量选择在开阔地上，最好是在相对固定的物体周围②。

二、应用 GIS 对调查材料的处理

GIS 是地理信息系统（Geographic Information System）的简称。地理信息指与空间地理分布有关的信息，是表示地表物体及其周围环境固有的质量、数据、分布特征、联系和规律的数字、文字、图形、图像等的总称。信息系统则指具有对数据和

① 徐绍铨等：《GPS 测量原理及应用》，武汉测绘科技大学出版社 1998 年版，第 188—189、204—205 页。

② 中国河南省文物考古研究所、美国密苏里州立大学人类学系：《河南颍河上游考古调查中运用 GPS 与 GIS 的初步报告》，《华夏考古》1998 年第 1 期。

信息进行采集、存贮、加工处理、管理和分析能力的系统,它能为用户提供各种有用信息。

GIS 系统由四部分组成:计算机硬件系统、计算机软件系统、空间数据、系统使用管理和维护人员。GIS 系统软件是其主要功能模块,它由空间数据输入管理、空间数据库管理、空间数据处理分析、空间数据输出管理及应用模型组成(图 6.24)①。目前比较通用的 GIS 系统软件是美国 Map Info 公司研制 Map Info 系统,该系统可以把一系统非正式、不规范的地理信息转向正规化,从而成为多个学科领域空间分布研究的首选。GIS 数据库数量大,涉及内容多,它可以把不同内容的资料进行综合处理。考古工作者利用 GIS 软件可以建立区域聚落遗址分布的地形图和位置图,统计、分析所得资料,以形成各个文化区域中不同生态环境的遗址分布模式,以此模式为基础,通过等量比较而推测未暴露考古地点的位置②。

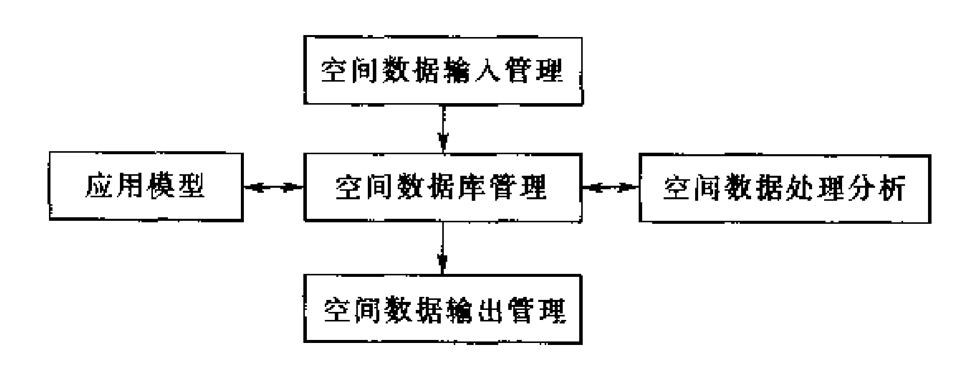


图 6.24　GIS 的组成结构示意图

(一) GIS 的工作原理

GIS 是一门介于信息科学、空间科学与地球科学间的技术。在 GIS 系统下,用户用自己的专业知识通过软件分析处理一定地域范围内的各项专业数据,以得到自己所需的新的有关信息等。也就是说,GIS 能确定地物之间的空间关系,并建立新的关系,且将新的属性与地物空间位置相连接,然后将它们存贮在图层的特征属

① 陆守一等:《地理信息系统实用教程》,中国林业出版社 2000 年版,第 6 页。

② 中国河南省文物考古研究所、美国密苏里州立大学人类学系:《河南颍河上游考古调查中运用 GPS 与 GIS 的初步报告》,《华夏考古》1998 年第 1 期。

性表中。

GIS 的核心是用来表示地理信息的空间数据。空间数据指那些与地理和空间分布有关的、反映现实世界各种现象及其变化的数据,其描述的是地球上各种实体和现象的空间、时间、专题属性;其一般包括用来表示空间位置的坐标数据、地理实体之间的空间拓扑关系,以及相应于空间位置的属性数据,三者以一定的逻辑结构存放在空间数据库中。

空间数据常用栅格数据和矢量数据两种模型来描述空间实体。栅格数据意味着地球空间被看作是一个在空间上处处有定义的连续整体,将它划分为规则的栅格,用栅格的行、列号来唯一地标示空间位置①。矢量数据基于矢量描述表达和处理空间地物特征,在矢量模型中,地球空间是各地球要素综合存在的空域,各要素的空间形态可用点、线、面来表示,点的位置用坐标对表示,线的位置及形状由其中心轴线上抽样点的坐标串表示,面的范围与位置用范围轮廓线上抽样点坐标串表示。

GIS 地理信息数据库实际上是表示这些信息的地图以及对图上对象详细特征的表达。不同的用户对空间数据的组织与表示方法不同,所以 GIS 数据库的建立可根据每个工作的具体要求来定,一般包括数据的内容、格式、精度、数据来源、获取和更新方式。它将各种数据源输入并转换成计算机所要求的数字格式。既可以将点、线、面放在一个整体中同时处理,也可以将它们分开(即将一个整体看作是不同的层组成的,而将图形中的点、线、面分别划入不同的层中,每一层只含有一种对象)。

当 GIS 数据库建立后,就可以进行空间分析,它包括简单的空间搜索和空间叠加、空间格局的描述及空间格局关系、对机理清晰的空间过程进行模拟等(图 6.25)。通过空间分析,对各种多量数据进行转换,可以获得有关考古材料的时空特征。

(二) GIS 的工作流程

第一步是将实体图形数据和描述它的属性数据输入和编辑,将不同数据源、不同类型、不同比例尺、不同时间的数据集成统一坐标的数据库系统。在数据采集的

① 于光远主编:《信息新视角——悄然崛起的地球空间信息学》,湖北教育出版社 2000 年版,第 330 页。

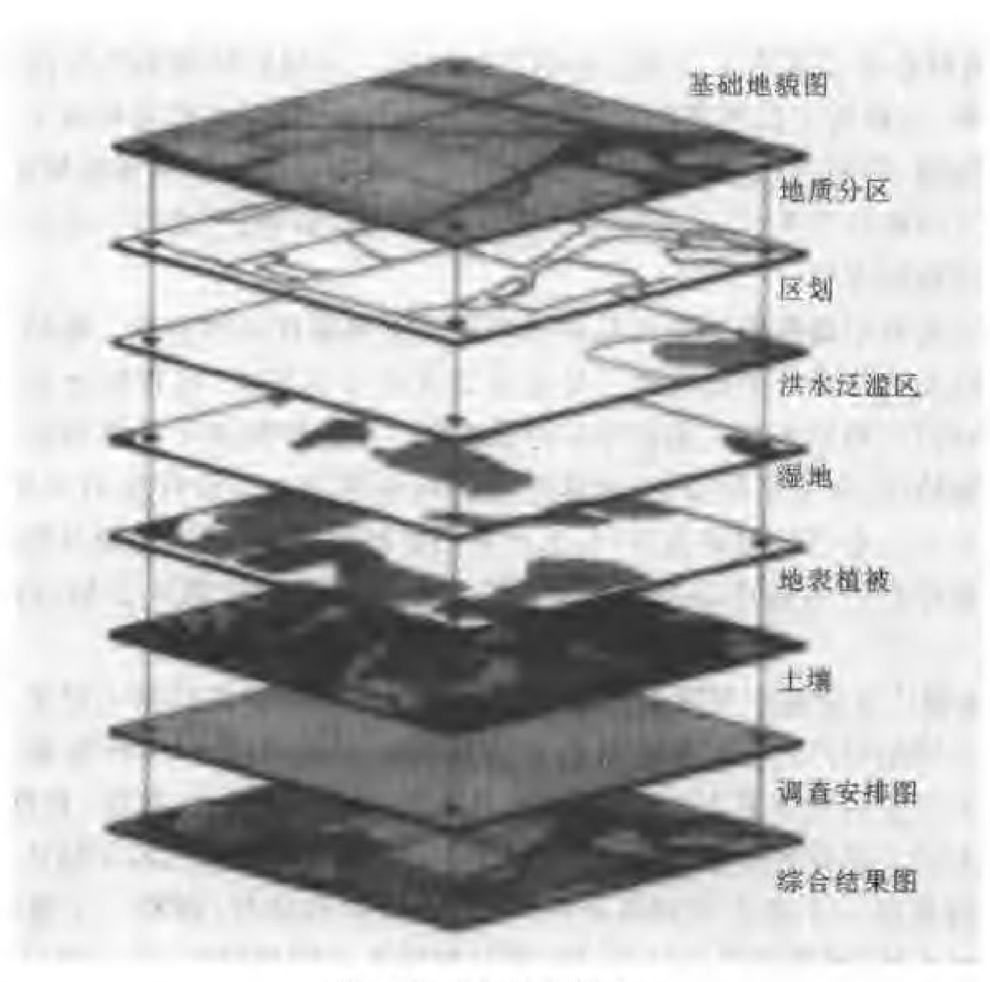


图 6.25 GIS 的制图原理

转采自曹兵武:《考古学:追寻人类遗失的过去》,学苑出版社 2004 年版。

过程中,要按照一定的格式和顺序,有时还要对图形和文本数据编辑、修改。

空间数据源的种类很多,如考古信息的空间数据包括地形图、各类地图(包括专题地图)、遥感影像、试验观测数据等表示遗迹空间位置的图像。这些数据的获取可归纳为属性数据和图形数据。属性数据包括所有的各种考古资料,反映着遗迹的内容、性质等属性,多采用手工输入法;而图形数据除此外,还可利用自动扫描仪、手扶跟踪数字化仪、解析测图仪、全球定位系统。

图形输入后,各类信息都要转化为数字的形式存入数据库中,通过图形编辑系统的拓扑组织功能形成 GIS 的点、线、面等复杂实体。

第二步,根据研究的范围、精度要求,对图幅进行拼接或分割。

第三步，对空间数据进行坐标转换和几何转换，这是因输入的数据具有多样性和输入的图形设备不同所致。坐标的转换主要指从窗口区到视图区的转换。图形的几何转换实际上是运用矩阵对组成图形的各点进行坐标转换，包括二维、三维图形的转换。

第四步，对矢量数据和栅格数据进行转换。转换时，先必须确定栅格元素的大小、两者的坐标表示。其坐标转换公式为

$$\Delta x = (x_{max} - x_{min})/J$$

$$\Delta y = (y_{max} - y_{min})/I$$

式中　Δx、Δy分别表示每个栅格单元的边长；x_{max}、x_{min}分别表示坐标中x的最大值、最小值；y_{max}、y_{min}分别表示坐标中y的最大值、最小值；I、J分别表示栅格的行数和列数。

第五步，空间数据经过初步的处理后，用户可以根据自己的研究目的，进行各种分析。空间数据的分析功能很多，就目前而言，主要有①：

(1) 查询检索。它不同于一般的数据库查询功能，包括属性查询功能、图形查询功能、图形和属性的交叉查询功能、空间目标间拓扑关系查询。

(2) 形态分析。对空间物体进行独立的个体分析，包括面积量算、距离量算、质心计算、体积计算、曲线长度和多边形周长的计算。

(3) 地形分析。通过数字高程模型进行等值线分析、坡度坡向分析、分水岭分析、视域分析、剖面分析。

(4) 叠置分析。它以叠置运算为基础对多种地学信息进行综合分析，诸如视觉信息复合、条件叠置、无条件叠置等。

(5) 邻域分析。根据指定的目标区检查邻近区域内的目标或相反，包括缓冲器分析、泰森多边形分析、曲线曲面的插值和拟合等。

(6) 网络分析。这与计算机的网络技术是两码事，它包括最短或最佳路径分析、空间规划等。

(7) 图像分析。包括图像的增强、图像分割、图像细化等。

(8) 应用模型分析。包括数学模型、统计模型、逻辑模型等。

---

① 陆守一等:《地理信息系统实用教程》，中国林业出版社 2000 年版，第 69、70 页。

目前空间数据分析的功能尚未系统化，而且随地理信息系统的应用范围的扩大，必定会增加许多分析功能。利用空间数据的特点，可以发展独特的考古信息系统。它具有如下功能：

（1）具有强大的空间信息显示和查询功能，根据需要改变图形显示的大小、位置、图层的组合，显示考古遗存的局部或整个研究区不同时期的分布情况。

（2）各图层及其特征可以被重新排列、编辑、剪贴，还可以增加新的考古资料。

（3）根据需要，进行区域考古的研究模型，对考古遗存进行三维模拟和显示。

（4）具有多重数据的访问和显示功能，利用热连接功能直接访问或打开所有GIS文件，使之与多重数据进行广泛而快捷的连接①。

GIS的操作流程比较简单，首先选择一个特定区域作为研究空间范围，输入一张该地区比较精确的地图（卫片、航片或一般地图）作为基础图，建立数据库。然后把有关该区域的所有考古资料（包括调查、发掘所获得的资料）输入数据库中。须注意的是，所有的植被、土壤、生物、水文、地理等环境因素应先分成不同的层面，每个层面都代表一个方面，然后将不同类型的数据都标绘在每张图上。最后根据研究者的需要对每张图进行复杂的处理。科技考古工作者可以利用GIS的优势把一张张含有各种信息的地图扩大或缩小、分割或叠加；根据研究目的，可以建立各种新的类型的信息，如我们需要某一特定区域不同时期遗迹中的房屋分布情况，我们可以调出所有的房屋图形数据再组成新的图像；当然也可将它们缩小到一页屏幕上。

用GIS可以有效地进行考古遗存的定位、分布和多种因素的分析，但它取决于输入材料的精确性、全面性，有时反而会误导人们放弃必要的统计和思考，所以使用GIS对使用者的要求较高（要求其有较高的考古专业知识和GIS操作技能），而且使用者操作时一定要作全面而详细的考虑，最好是多人合作或团体操作。

三、3S集成在考古中的运用

GPS、GIS、RS（遥感技术）技术各有优缺点，相互结合可取长补短。在实践中，3S集成产生了。它是指三者对地观测新技术有机地集成（Integration）在一起。3S

① 刘建国：《3S在考古领域的应用与研究》，《青年考古学家》总第12期，2000年。

集成运用时，GPS 用来实时、快速地提供目标地空间定位（如考古遗存的位置和形制）；RS 用来实时或准实时地提供目标及其环境地信息（如考古遗存的勘探），发现地表的各种变化，及时对 GIS 数据更新；GIS 通过对各种来源的时空数据进行综合处理、集成管理、动态提取，做成新的集成系统的基本平台，且为智能化数据采集提供地学知识，如处理、分析考古遗迹的图形数据和属性数据。3S 集成系统中有四种模式：GPS + GIS、GPS + RS、GIS + RS、GPS + GIS + RS。例如第一种模式，通过 GIS 系统，可使 GPS 的定位信息在电子地图上获得实时的、准确的反映及漫游查询，GPS 亦可为 GIS 及时采集、更新或修正数据。运用 3S 集成技术可以实现整体的、实时的、动态的空间系统研究，使研究人员在宏观、微观的角度，分析各种规模的人类物质遗存及其周围环境的空间结构和相互作用，定性、定量地讨论古代人类活动。

1996 年 6—8 月，中国河南省文物考古研究所与美国密苏里州立大学人类学系采用地面踏察、观察断崖剖面、文物钻探、GPS、GIS 等方法，联合调查了河南颍河上游两岸长约 100 公里范围内龙山文化晚期到二里头时期的聚落遗址①。

我们以其中的一个典型遗址程窑为例说明 GPS 的运用。其程序为：

（1）通过传统的踏察法确定了遗址的大致位置。

（2）在该遗址中部偏北侧的东西向石砌水渠东端南侧的一个石柱中心设 GPS 点。GPS 点位置的设置基于这样的考虑：设置于相对比较固定的永久性参照物附近以便于日后确认；尽可能接近遗址中心区域以便了解遗址文化堆积状况和测绘平面图。经 GPS 测定，该点的地理坐标为东经 113°04.686′，北纬 34°24.222′，海拔高度 278 米。

（3）为了进一步了解遗址的堆积深度、厚度、分布状况，又进行了钻探（探孔位置见图 6.26）。其中 1 号探孔位于 GPS 点，2 ~ 4 号探孔基本把握了遗址现存的三个边缘。通过钻探法分析，根据采集的文物特点将遗址分为五期：仰韶文化期、龙山文化期、二里头文化期、商代二里冈文化期、东周及秦汉时期。

（4）这次调查应用的全球卫星定位仪在地形图上确定了 25 个遗址中心点的经度、纬度、海拔高度，并以此为基点测量遗址边缘定位探孔的相对角度和距离，从

① 中国河南省文物考古研究所、美国密苏里州立大学人类学系：《河南颍河上游考古调查中运用 GPS 与 GIS 的初步报告》，《华夏考古》1998 年第 1 期。

而测出各个遗址的现存形状、周长、面积及高差。

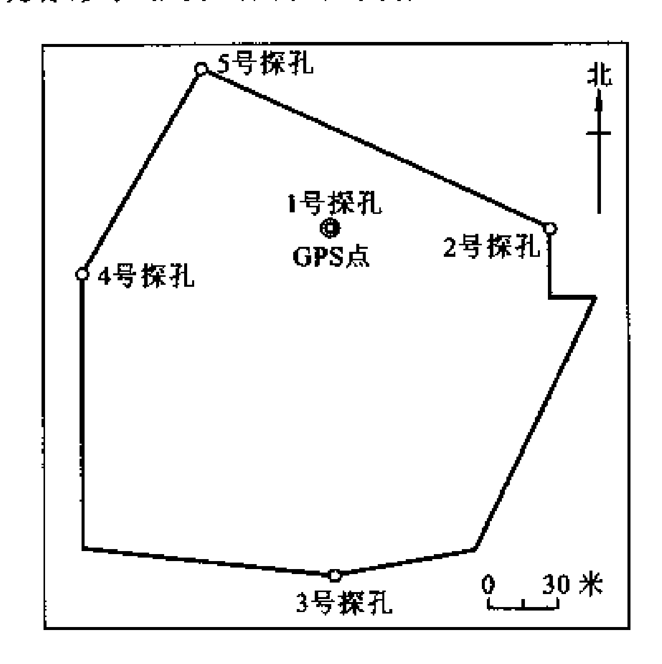


图 6.26　程窑遗址分布范围与探孔分布图

采自中国河南省文物考古研究所、美国密苏里州立大学人类学系:《河南颍河上游考古调查中运用 GPS 与 GIS 的初步报告》,《华夏考古》1998 年第 1 期。

GIS 法是以这次调查的 25 个遗址独立的地理位置为基础,在 ARC/VIEW 和 ARC/INFO 分层储存。在野外,根据现有条件,先用小型扫描仪对地图上的颍河上游谷地进行扫描,这些影像的档案通过 Adobe Photoshop 计算机软件程序摹绘影像中的每一条等高线、道路、河流及每个多边形的建筑物、村庄和城市,并以无数个点的形式出现,经软件转换成精确的在 X、Y 轴上的数据。这样,25 个分层储存的遗址可以有机地连接在一起,形成颍河上游所调查遗址的相互位置图,与此图像相应建立起一个精确的数据库,利用这个数据库可以抽出地形图中的任何点、线或多边形的位置、长度和面积进行相对位置、相对量或相对空间关系的比较。这次调查的结果表明这 25 处遗址几乎都分布在颍河两岸的台地上,而且多在颍河及其支流的交汇地带;遗址的分布也有规律可循(现存间距大约 4 公里),其分布密度以龙山文化晚期遗存为主体,据此我们可以观察到龙山文化、二里头文化、仰韶文化聚落形态的空间分布。

3S集成的另一例子是中国历史博物馆遥感与航空摄影考古中心等单位展开的对内蒙古中、东部地区大型古代遗址的勘查和研究①。研究的流程是：

(1) 信息源的建立与完善。收集了各种文献资料、现有的航片和卫片、专为考古拍摄的竖摄和斜摄航片、各类地图、地形图。为确保数据的尽可能精确，工作人员用 Microsoft Visual Basic 开发了 GPS 数据采集程序、实测草图描绘程序、地面控制点数据库。

(2) 全面的地面 GPS 定位勘测。

(3) 图像和数据的后期处理。采用 ERDAS Imagine 进行了图像增强、航片的校正、图像的拼接、目标区的勾画、专题图的制作和图像的存贮处理。

研究的结果可喜，获得了相当多用传统考古学方法无法获取的资料，如元上都的布局在航片上清晰可见，同时可看出元上都的修建、改建痕迹，而地面上一些遗迹分布已不清楚。

3S集成技术虽然已取得相当成效，且应用前景广阔，但也存在一些问题，主要是目前系统的设计、应用过程的不完善，诸如集成系统的实时空间定位、一体化数据管理、信息的自动提取、数据的自动更新、数据实时通信、影像的空间可视化等，这些问题都需要专家去研究和解决。

思考题

1. 试述科技考古探测的优越性。
2. 何谓遥感、遥感技术、遥感考古？
3. 摄影图像的物理特性是什么？如何判读摄影图像？
4. 简述遥感考古的程序。
5. 试述考古物探的概念、原理及其类型。
6. 举例说明地球化学勘探在考古中的应用。

① 杨林等：《GIS技术在遥感航空摄影考古工作中的应用》，《科技考古论丛》(第2辑)，中国科学技术大学出版社2000年版，第73—78页。

第七章
水下考古

水下考古的对象是存留于水中的遗迹和遗物。水下遗迹、遗物的形成，或是由于地壳运动使原来陆地的城镇村庄深埋水中；或是由于海啸、飓风、机械故障等造成的水上交通事故，使无数的船只及船上运载的人员、物品沉没。另外，水下遗迹、遗物还包括古代人由于种种需要设置的码头等水中建筑、古人投入海中的祭品等等。这些水下遗迹和遗物随着时间的推移和环境的变迁已难觅踪迹。通过水下考古，可以将它们搜寻和发掘出来。

文艺复兴以来，人们对古希腊、罗马的雕塑、艺术品非常喜爱，除了在陆地上进行探寻之外，人们对海底世界也产生了极大兴趣。早在15世纪，欧洲已有人开始对水下的文物进行打捞探查。1446年，意大利的利昂·巴蒂斯塔·阿尔伯蒂对罗马东面内米湖底进行了探查，试图打捞一艘罗马时期的沉船。两个世纪后印第安人在佛罗里达海峡的西班牙"桑塔·玛戈丽塔"号沉船中打捞到350块银锭、几千枚银币和其他物品。1832年，第一部科学探讨水下遗物的著作问世，C.莱尔的《地质学原理》第16章论述了水下地层埋藏的人类遗骸及人类制造物。19世纪中叶瑞士湖上居址的确认，以及进行的水下古代遗迹的科学调查和发掘，标志着水下考古学的确立。20世纪初，在地中海发现的许多古代艺术品吸引了对中世纪文物有兴趣的人们，大批的青铜质和大理石质的雕像以及罗马战船被发现。1904—1907年，美国的爱伍德·H.汤姆森用钢铁制的戽斗疏浚机通过潜水对玛雅文化的圣池进行了调查，发现了40多具人骨，打捞到精雕的金圆盘、面具、戒指、臂钏、耳环、小铃等装饰品和香料、树脂、石器、木器、丝织品等遗物，证明了以少男少女为牺牲品

和以贵重物品、金属制品为祭品的记载比较可靠。1935—1937 年,法国考古学家安德亚斯·普瓦德巴尔神父组织调查团,利用航空侦察和水中勘查的方法对黎巴嫩地中海沿岸的推罗遗址进行了调查,确认了该遗迹。20 世纪中叶以后,随着海洋学的发展,各种水下探测工具的改进,凭借海洋技术装备,尤其是便携式潜水工具——水肺,使考古人员可潜人水中直接对水下遗存进行考古调查和发掘,调查的范围扩及世界各地。其中著名的是 1960 年美国考古学家乔治·巴斯(George Bass)对土耳其格里多亚角(Cape Gelidonya)海域的 7 世纪拜占庭时期沉船遗址的调查和发掘,这是考古学家首次将考古方法应用于水下遗址的发掘和研究,开创性地在水下实践了考古学方法。1965 年,在冕纳召开了水下考古学国际会议成立大会,主要探讨水下考古探查的技术和方法。1970 年,水下考古学国际会议第四次会议和水下考古学国际讨论会召开,与会学者对已有的水下考古成果进行了评估,并讨论了将来的调查计划、文物保护等议题。之后,水下考古的论述、专著亦纷纷问世,如《水下考古学》、《船舶考古学》、《海洋考古学》[①],水下考古逐渐从海底探宝中脱离出来,有些人甚至将之称为"水下考古学"。由于水下考古的特点,在此将水下探测与发掘一起叙述。

水下考古是美国最先创立的,在美国、意大利、瑞典、英国等欧美国家和苏联、日本等国家都已积累了许多经验,并有相当的进展。而我国水下考古起步较晚,尽管夏鼐先生在"文化大革命"期间曾建议开展水下考古,但终因种种原因而无法实施。1986 年 9 月,水下考古学研究中心成立。1987 年 3 月成立了"国家水下考古协调小组",11 月成立了"水下考古学研究室"。1990 年我国第一支"水下考古队"诞生了。自 80 年代中期以来,我国水下考古工作者先后在中国的四大海域——渤海、黄海、东海、南海——进行了多项水下沉船遗址及其他水下文物遗迹的调查、发掘工作。如对福建连江定海沉船遗址、广东吴川沙角沉船、山东胶南琅琊台沉船遗址和海南文昌宝陵港沉船进行了调查,并先后与澳大利亚、日本等水下考古科研机构合作对福建和广东两艘沉船进行了勘探发掘。我国水下考古队第一次独立完成的水下考古项目,是 1992 年夏在辽宁绥中县三道岗海域对一艘元代沉船的勘查,

① Bass G F. Archaeology Under Water. Thames and Hudson, London: 1996; Wilkes J. Nautical Archaeology. David and Charles, Newton Abbot, 1971;[英]基思·马克尔瑞著、戴开元等译:《海洋考古学》,海洋出版社 1992 年版;[日]小江庆雄著、王军译:《水下考古学入门》,文物出版社 1996 年版。

在勘查中应用了现代科学探测新技术，探明了该沉船为一满载瓷器的商船及其残存现状，并打捞出元代磁州窑瓷器 47 件及铁器等遗物。这对我国航海史、水上交通和贸易及古陶瓷制作等相关学科的研究具有重要的意义。2001 年 6 月对云南澄江抚仙湖进行了调查、打捞，确定了其是距今 1 750 年以前的古建筑。

水下考古经历了由打捞寻宝的商业行为、业余潜水者的探险活动到恢复遗迹、遗物的原貌的过程，其兴起由以下原因促成：

（1）人们对海洋的探险和向往以及很多海洋捞船、拖网渔船偶尔打捞出来的文物，激发了许多海洋家、探险家强烈的挑战、冒险、寻宝意识，他们在不断的冒险生涯中丰富了人们对水下古代遗迹、遗物的认识，而且不断地提高了海底操作技术。此外，各领域的学者对主要航线的海底地形、地质面貌、海洋生物、物理资源进行调查，积累了相当多的知识，同时摸索出古代沉船易于沉落的地点和范围。

（2）因军事需要进行的沉没船只的货物抢救、排雷、整修以及海滩救援作业，使海底的探查技术得以深化，如出于追踪潜水艇的战略需要开发的声呐技术，最终用于考古调查中。

（3）航空侦察的发现推进了空中调查与水下勘查的结合。1935 年首次用这种办法确认了地中海沿岸的推罗遗迹，之后，安孙·瓦兰塔通过航空摄影拍摄了北比迷尼岛附近海底的巨石建筑物（水深约 10.7 米）。苏联的考古学家利用空中摄影的方法确定了凯尔索奈斯的位置，又通过潜水员和水下摄影，在乌克兰的凯尔逊海域发现了古代城市。

第一节　水下考古的特点

一、水下考古的困难

水下考古与陆上考古相比有许多困难。

首先，自然环境发生了很大变化，水下条件较差。古代沉船大多沉没在环境恶劣、礁石密布处，水下的能见度差；而且由于与空气隔绝，水下的光学、声学条件极差，这严重影响了考古工作者的辨别力；再加上海水的水质、水温、氯气等不利因素，对于习惯于陆地生活的工作人员是一个非常严峻的挑战。水下考古要求考古队员到达水底，遗迹的测量、摄影、记录、发掘、清理、打捞等均须在水中停留一段时

间进行。这样考古人员必须克服多种不利的工作环境,在有限的时间内有效地完成工作任务。

其次,空气的供给受潜水装备的限制。目前轻装潜水虽已普及,但潜水调查仍受很大限制,如开路式水下呼吸器一罐可用0.5~1个小时,闭路式潜水器一次可在水下呆三天三夜。近年来,新发明的微型潜水艇和其他潜水装备,以及潜水呼吸传动器(Scuba Diving Gear),使得潜水员在水下可以停留更多的时间,同时也可达到以前不能达到的深度。尽管如此,水下作业受空气供给限制的问题仍然存在。

再次,水压的干扰也大。工作人员潜水越深水压越大,浮上水面花费的减压时间就越长。据统计,在水深10米处,人可在水中停留约4小时;水深20米处,可停留45分钟;水深30米处,可停留20分钟;水深50米处,可停留7分钟。潜水员最深只能到达60米,再深的海域将无法亲自作业。过去常常是工作台船上的考古学家与水下的潜水员合作打捞,因潜水员无法科学地记录海底状况,现在要求考古人员亲自潜水操作。

最后,一连几个月的海上生活也有诸多不便,台风、饮食补给、成群的苍蝇、鸟以及水下的珊瑚、水母、海胆随时都有可能威胁到考古队员的安全。

所以,考古队员可能会面临许多困难,要设法克服它们。考古队员下水前要接受两三个月的潜水技术和水下考古技术的专业培训。水下工作存在能致人于死地的危险,潜水员呼吸的压缩空气和气栓塞,如处理不慎,就可致人伤残或死亡。避免这种情况的最好办法是通过严格的训练和教育,提高水下工作者的自信心。

让人忧虑的是,水下考古工作者除了要战胜内心的恐惧以避免意外伤残外,还要面对许多人为的障碍。日益严重的海洋污染,尤其是在近海海域,使得原本就受自然条件限制的水下考古工作更要在人为障碍面前作艰难的抗争。在1991年第一次对辽宁绥中沉船遗址进行考察时,水下能见度为0.4~0.5米,而到了1996年、1997年,在水下几乎看不见任何东西,必须借助灯光。

水下考古工作还需要一个有效的合作团体,这项工作绝非个人的力量所能完成,它有赖于各相关学科专家支持,而且经费昂贵,因此需要制定综合的研究体制,并且要落实到调查、打捞工作中。在这个团体中以考古学为主体,与其他领域的研究者协作进行,任何个人的冲动、调查方向的偏离都有可能延缓考古作业,甚至会破坏遗迹、遗物,造成无法挽救的损失。严格的等级工作制度、合理的管理规则、各

种手语(因潜水者无法和水面上的人自由通话,所以须借助于各种身体语言;曾经有人发明了"水下电话室"[①],但须接受训练后才能使用,不具有实际应用价值)等是工作顺利进行的保障。

二、水下考古的优越性

尽管水下考古困难颇多,花费昂贵,但水下考古具有一些陆上考古无法比拟的优越性。

(1) 由于水的浮力,可实现遗物的自动分类拣选,其原理与浮选法雷同。既可以节省清除淤土的时间,又能避免不同种类尤其是小的动物骨骸的遗漏,提供了比较全面的资料。

(2) 水下的保存环境好。水下特别是海底存在缺氧环境,抑制了有机物的分解、生物、化学作用,在深水中淤泥、软泥、海洋生物、灰尘的含盐度、温度低,它们包裹在遗物上降低了金属的化学腐蚀速度,因而水下有可能保存有状况良好的各种易碎有机物遗物。

(3) 水下遗物具有精确的时间凝固性。沉船是在无法预知的情况下突然间发生,沉船连同其中装载的东西包括人会在同一时间内倾入水中,所以,同一处遗址的器物应属同一时期,甚至可以精确到某一天,其精确度显然高于陆上器物组合反映的时间尺度。而且除了表层几厘米厚的沉积易受扰动外,"绝大多数遗址,包括那些完全裸露的海底的遗址,在长时期里都是静止不动的"。[②] 这样,水下遗存的早晚堆积关系比陆上要简单、清晰得多。当然,研究时要注意区分沉船上和打捞者掉落的物品,特别是时间接近的打捞行动。如果沉船中装有沉船时已属古玩的物品,则要区分古玩与船载当年所造物品的时间。

三、水下考古的原则

水下考古遵循陆地考古学的一般原则,所有调查、勘探、测量、摄影、发掘、年代测量、保存、修复等,都同陆地考古学的研究方法一致(图7.1)。

水下考古需要了解遗迹及其相互间的关系。一般采用探方法,将钢筋固定在

① Bass G F, Katzev M L. New Tools for Underwater Archaeology. Archaeology. 1968,21:165-173.

② [英]基思·马克尔瑞著、戴开元等译:《海洋考古学》,海洋出版社1992年版,第28页。



图7.1　水下考古作业示意图
采自中国国家博物馆:《中国水下考古》,载《中国文化遗产》2004年(秋季号)。

岩石上,按照网格状分布(如5米或2米见方的探方网)。水下的探方网必须能移动(图7.2)。一般而言,测量与摄影工作同时进行(图7.3)。由于水下遗存的特殊性,为避免色彩干扰,摄影必须是在水下近距离进行。将摄影器材、照相机安放在固定的支座上,确保无论何处的摄影都保持在一个绝对水平上,以保证能成功地完成实测图的拍摄。如果要测水下遗迹的等高线地图、地层堆积图,最好是使用立体摄影装置,但这种特殊仪器耗时、昂贵。在亚细·阿达遗存的调查中使用了一种简便的方法。将照相机放在距离被摄影体约6米高的水中,每隔1~2米设一拍摄点,逐点拍摄,到陆地后将冲洗后的照片逐张拼对,几天便可完成极详细的遗物分

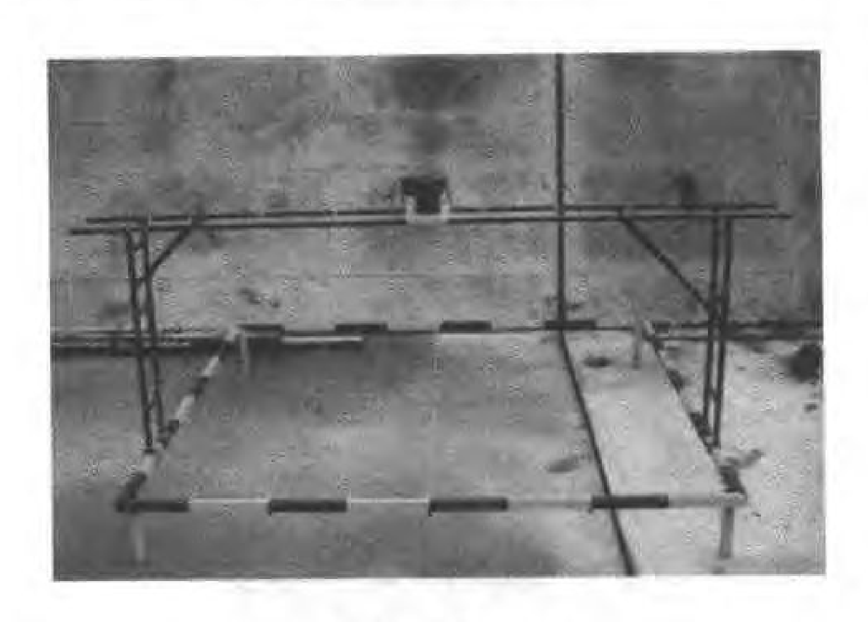


图 7.2　水下探方网



图 7.3　西沙海底摄影和测绘
采自国家文物局主编:《1999 中国重要考古发现》,文物出版社 2001 年版。

布图①。水下测绘的仪器有铅锤、精密的水平尺和支角坚固的平板仪。测绘时将

① [日]小江庆雄著、王军译:《水下考古学入门》,文物出版社 1996 年版,第 153 页。

平板仪放在遗迹的两侧或四周，将结果标绘在白色的水下调查专用绘图纸上。

水下考古必须正确地记录遗存的原状，尤其要全面考虑遗迹的整体关系，这就要有完整、详细的记录。也就是说，“水下作业的重点是绘制正确的调查地点的海底地图，并对散落在周围的每一件相关遗物分别进行测量”①，当然水底摄影也是一个必要手段。这点与陆地考古一样，要求即时（在水下）完成全部的记录工作，以消除记忆力的差错。我们知道，水下物体体积会发生视觉畸变，所以调查时一定要客观、细致，绝不能相信直觉。调查的结果必须显示在一张张非常精密的海底遗迹平面图、遗物分布图和照片上。

水下考古过程中，要先将盖在遗物上的淤泥视土方量大小用清淤机（如小功率的挖泥机、大功率的提升机）或人手、铲子、小桶清除，之后再记录。受海底可视度、水压、潜水时间的限制，所有动作必须准确迅速，这就要求多人合作；还要避免人的游动引起水的污浊，因而工作人员要尽可能同时行动。

工作过程中要密切注意水底土色、土质的变化、水底地形的起伏情况。水底土质、土色的变化很可能反映其中包含不同时期的物质遗存，或遗迹间的打破、叠压关系。此外，水底地形的变化，也极有可能与不同种类的遗迹、遗物有关。

水底的发掘程序与陆地相同，即逐层揭露，随时记录。注意水下遗迹的剖面图一般不像陆上的垂直光滑，这是因为水下沉积疏松，不易形成垂直剖面，不存在非常明确的地层结构。记录水下遗迹的剖面图当然要花费相当多的时间，但是资料的科学性不允许任何的马虎。

发掘装有器物的完整沉船的方法类似陆上的建筑遗址，而没有遗物的沉船则可采取发掘陆上的燧石、贝类遗址的方法。

四、水下考古的方案

从理论上讲，水底打捞方案不外乎于三种：第一种是将水下的遗迹与水隔开进行工作；第二种是将有遗迹的水域内的水完全排除；第三种是工作人员直接在水中工作。

第一、二种方案比较适用于较小规模的工作，而且遗址所在的水位必须较浅。

① ［日］小江庆雄著、王军译：《水下考古学入门》，文物出版社 1996 年版，第 141 页。

水下遗址可用钢筋或混凝土筑成围堰，排除积水后，就同陆地遗址一样了。内米湖的打捞是墨索里尼政权下令进行的，是就近将水排到一个低于海拔高度的湖中，使水位下降 3 米后再打捞，使两艘罗马时代的木船再现雄姿。丹麦的奥尔森对罗斯基勒峡谷的苏科尔代莱瓦拜海域的调查则采取了围堰法。因为海水很浅，先向地下打入钢板桩建造堤坝，形成围堰，再使用抽水机将其中约 1 337 平方米的水抽掉，待遗址完全干燥后用陆地发掘方法发掘。①

排水或隔离水打捞方法非常有限，如果在较大范围内使用，耗资巨大，几乎与排水造田相当；在水较深时，同样需潜水、声呐、水下摄影机等设备调查；更为主要的是，这种方法不能掌握遗址的整体面貌。

第三种方法是目前应用最广泛的，利用潜水装置、声呐技术、水下测量仪器、水下照相机、电视摄影机、计算机等可以有效地调查水下遗迹并将遗物科学地打捞出水。

第二节　水下探测

一、水下探测的方法

水下探测只有依靠各种科技手段和先进的设备，才能获得科学的结论。水下搜寻因能见度差及其他困难大多普遍采用各种电子探测器——各类遥感仪器。

水下探测的原理与物探、遥感相同，都是利用考古遗存与周围环境物理性质差异的特点，所以水下探测也可使用地球物理化学法勘探（图 7.4）。用化学方法，分析目标区域内海底水样的成分，通过原子吸收技术观测文物在海水中原子扩散量的变化，间接地寻找古代各类遗址、遗物群。地球物理勘探技术的应用机制，是利用水下目标物自身产生或反馈的各种信息，如磁法、放射性、重力法等是利用仪器测取水下物体本身所具的磁性、放射性、密度等物属性所产生的信息；电法、声呐、地震法等，是利用仪器测取水下物体所反馈的信息。无论上述哪种方式的探测，测取信息的仪器装置越接近目标物，探测效果就越好。

① ［日］小江庆雄著、王军译：《水下考古学入门》，文物出版社 1996 年版，第 10、86 页。

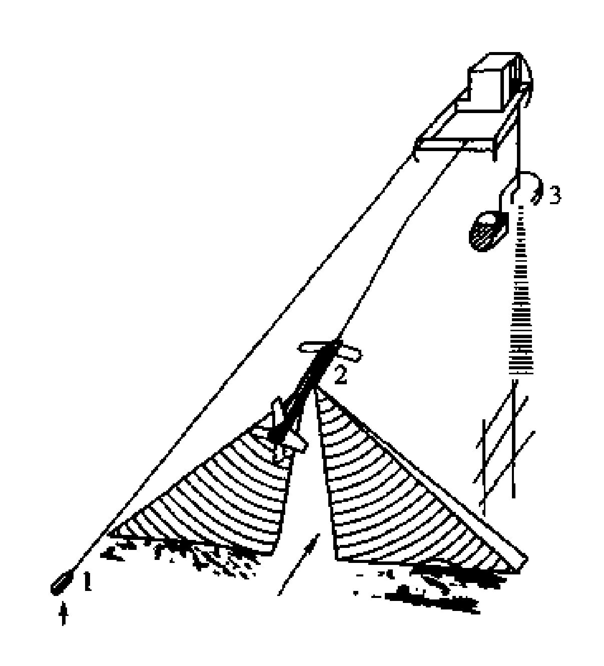


图 7.4　水下地球物理探测的三种方法

1. 质子磁力仪由调查船拖曳，来探测钢铁物质，这些东西会扭曲地球磁场；2. 侧扫描声呐以扇形传递声波，形成海底表面遗迹的图像；3. 海底剖面形成仪传递声音脉冲，遇到海底埋藏的遗迹、遗物时反射回来。

采自科林·伦福儒、保罗·巴恩著，中国社会科学院考古研究所译：《考古学：理论、方法与实践》，文物出版社 2004 年版。

1967 年美国曾应用自然电场法探寻到 1864 年沉于海中的一艘装甲船。美国也曾应用磁法寻找内战时期沉于水中的车头、大炮等，并获得理想的效果。2000—2001 年法国考古学家弗兰克·戈迪奥所在的考古小组沿埃及北部海岸线 6～9 米深的海底搜寻，他们利用电磁波等高科技手段绘制了一幅说明各个建筑的方位图，后来打捞出的石柱、雕像展示了伊拉克利翁古城的文明。1993 年夏，中国历史博物馆水下考古研究室在组织对辽宁绥中县三道岗海域元代沉船的探查中，应用浅层地震法对沉船及海底环境进行探测，结果表明沉船遗址厚 1.1～3.6 米，最高顶面高于海底 2.5 米；经考古试掘证实，此为一艘满载陶器的元代商船，其露出海底部分已完全被沉积物所覆盖，且非常坚硬①。

① 张寅生：《水下考古与水下考古探测技术》，《东南文化》1996 年第 4 期。

地球物理勘探的应用前提是水下目标物所产生或反馈的信息的强度与其周围物质同种信息的强度的差异。这就要求我们在实际应用中要测取多种信息，综合运用地球勘探技术中的多种方法，对测量结果进行多参数解，这样才能获得更科学的信息。

由于水下遗存环境的特殊性，所以勘探时有一定的要求。在深度较浅、透明度高、几乎没有波纹、无反光的观察角度，因颜色或色调的不同，可以看见和成功地拍摄水下遗址[①]。地中海沿岸地区的海水碧蓝清澈，比较适合航空摄影探勘。如在发掘希腊南部伯罗奔尼撒半岛东部的一座古城哈里埃斯（Halieis）时，在其北部500米处的海湾里发现了公元前7世纪修建的阿波罗神庙建筑遗址（图7.5）。该



图7.5　希腊南部哈里埃斯故城阿波罗神庙水下空中摄影像片

遗址的石基部分尚保存完好，大致位于现水面下2米深处。考古工作者用一个系留气球携带的照相机，在距水面约50米的空中自动拍摄（将控制气球的绳子系在船上，用无线电遥控照相机）。另外，瑞士高山多湖，许多湖泊下掩埋着史前时期的遗址，用航空勘察后发现了更多的史前遗迹，而且对每个遗址也能进行全面、系统的研究[②]。

遥感除了从空中对水面进行遥感与航空摄影探测外，还可以在船上安装声呐、水下电视机等进行遥感勘探。

---

① 许志勇：《航空摄影与考古的基本方法》，《北方文物》2001年第1期。

② 宋宝泉、邵锡惠：《遥感考古学》，中州古籍出版社2000年版，第170页。

声呐法实质上是在水下应用超声波探测，它和空中使用无线电波的雷达工作原理相似，就是人为向水下发射超声波，当声波碰到障碍物时便反弹回波，接收装置收到回波波形再传给船上的记录分析仪器如计算机，通过对传播时间、回波方向等数据处理可推断出水下考古遗存的形状、大小、方位、距离等。现在的声呐装置上还有显示器，工作人员可直接看到海底实况。声呐法可探到水中几十公里甚至几百公里，声呐装置的超声波波长短、频率高、探测分辨力强，因而被称为"水中雷达"。声呐法是利用目标物反弹的回波进行探测的，适合探测暴露或部分暴露在海底面的目标；而水下的考古遗存坠落在海底，大多堆积在海底面上并稍显突出，适合声呐法探测。在欧洲，考古学家们多次应用声呐类方法探测出埋藏在海底的沉船和城市遗址。

二、水下探测的步骤

（一）探测前的准备工作

调查之前，应先对探寻目标有一定的了解，这就需要丰富的相关资料。水下探寻的必备资料是文献记载，文字资料描述的已消失的古代文明、满载货物财宝的船队、征服远方的战船如今都在水下等待人们来复原。另外，已经打捞获取的文物是比较可靠的信息来源，特别是有文字的器物。还有，一些民间传说和消息也对调查目标有所帮助，它能提供许多史书上未有的线索。此外，还有必要向当地的渔民和海员了解海底的地形结构、古今有无变化。尽管手里有地图，但并不等同于对海底情况的了解，最好能在海洋部门获得研究区域的海底地形图、卫星图片等，许多第二次世界大战时期的航空摄影底片保存了未被污染的海底情况。值得注意的是，要搜集当地的时间、天气状况，根据现有的气象资料，计算坏天气可能造成的损失，以便制定计划时考虑充分，降低不必要的成本。

由于水下考古工作的特殊性，使得各种仪器、设备的准备工作尤为重要，精确、高质量的设备是水下操作的有力保证。完好的声呐设备和计算机直接反映着水下资料的清晰度，通过彩色声呐光谱的变异可以了解遗物的位置、性质。潜艇上可装备各种高灵敏度测量仪、各种声学测距仪器、立体摄影机和照明装置，测绘仪器有铅锤、精密的水平尺和支脚坚固的平板仪，潜艇摄影如同空中用飞机摄影一般，胶卷等各种器材也必备，还得考虑到特殊情况下的处理手段。潜水员的供气系统和

联系系统在某种程度上决定着调查工作的成败。各种打捞工具、装置等都必须在下水前考虑充分，清淤机器如淤泥清除机能很快地清除沉船堆积的泥土，并使壶类遗物利用浮力自动浮出水面，升降提升设备则能顺利地采集遗物。此外，考古队员必须使用潜水设备，如呼吸器、潜水服、面罩、压铅、脚蹼、潜水表和潜水刀等，它们分别起到水下呼吸、御寒、提高视力、水下平衡、移动、掌握潜水时间和防止水下绞缠等作用。这些潜水用具虽然能保障潜水员的生命安全，但同时也增加了潜水员的负担，限制了潜水员身体活动的自由度。

考古工作者须进行潜水训练和技能训练。水下勘查一般利用装在船上的水下旁视声呐或其他手段获得整个区的普查信息，再根据需要派人潜水工作。过去，由于考古者潜水能力的不足，常常采取合作方式，即考古学家在工作台上与水下潜水员密切联系，潜水员将观察到的情况反馈给考古学家，考古学家再向潜水员指示操作方法，这样做常常使工作脱节。因为潜水员对考古学不了解，尤其对仪器仪表的征象识别经验不足而致使许多信息遗漏；而水下考古工作本身是一种破坏，一旦发掘将无法复原。有鉴于此，目前已有众多的考古学家进行潜水技能训练，一般的调查发掘也由考古工作者承担。即便条件不允许，也必须让有经验的人实地取样观察后再搜寻和发掘。

（二）水下探测实例

在了解现有资料的基础上设计探查线路，对整个海域进行分区调查。原则上，可用考古船载着声呐等探测设备在目标海域进行大范围的巡游扫描，寻找可疑点。由于水下探测的费用昂贵，普查是不可能的，一般进行专题探查。根据目标情况制定调查方案，要充分考虑沉船的环境和沉船的系统结构保存状况，将保护与考古调查、发掘有机结合。工作时，携带照明、摄像等设备潜水至可疑点海底作近距离观测，并采集回图像或实物信息作进一步分析、确定。

辽宁绥中元代水下沉船遗址被评为1993年全国十大考古新发现之一。对该遗址的调查比较科学，现简述如下。

1991年7月，渔民在绥中县三道岗海域打捞出一批元代瓷器，中国历史博物馆水下考古研究室对该地进行了第一次水下考古调查①。这次探测采用旁测声

① 鲁娜：《探索蓝色文明——水下考古》，《地理知识》1999年第2期。

呐、高精度磁测、浅地震剖面测量等法，共发现5个异常点。其中1号异常点的水深11米，水下有一近南北向的条形物，长约25米，宽约5米，可能是沉船。声呐图像亦显示该地区的海底有被拖网严重扰乱的痕迹，与当时渔民打捞瓷器的情况相符。经考察，发现一长约21米，宽约6米的沉船，这艘船上装载有元代磁州窑的瓷器和一些铁器。

1992年6—7月对该遗迹进行较大规模的第二次调查发掘，特聘请地矿部航空物探遥感中心进行技术配合。首先由地矿部航空物探遥感中心技术人员对沉船海域进行扫描和定位，探明了三道岗海域沉船分布情况，测定了沉船遗址的准确经纬度位置。根据探测工作的结果，开始进行水下调查工作，对沉船进行了表面测量、表面采集和水下摄影、摄像工作。探明沉船长约27米，宽5米，表面上覆盖着厚厚一层凝结物，经采样发现，凝结物中包含有大量的瓷器。

1993年6—7月的第三次调查和试掘聘请地矿部第一海洋地质调查大队的科技人员，使用浅地震剖面仪对沉船船体进行探测，以期探明沉船剖面和在海底地表下埋藏的情况。探测工作共完成测线13条，东西向7条，南北向6条，其中有5条穿越沉船遗址表面，获得了较明显的沉船剖面记录，探明船体的厚度为1.1～3.6米，最高顶面高于海底2.5米。

在此基础上，水下考古队员对遗址进行了发掘前测量。依靠2米×2米可移动测量方框，在能见度几乎为零的条件下，队员们对遗址平、剖面精心测量，绘制了完整的平面图和以基线为剖线的剖面图。经测量证实，沉船露出海底的部分长约16米，宽约7米，呈北偏东走向。完成测量后，对遗址表面进行了清理，并选择遗址的边缘部位作小面积试掘，发掘出水了70件遗物。

1994年6—7月，水下考古队开始对辽宁省绥中县三道岗海域进行第四次调查准备和试掘工作。在发掘之前，为保证发掘工作的科学性，便于进行探方发掘和摄影摄像，保护遗址不受渔民铁耙网的破坏，设计了一个20米×10米的拼接式发掘框架，放置到水下，基本将遗址整体圈在框架之内。此次发掘共出水了145件完整的瓷器和一批铁犁铧。与前三次调查一样，对出水器物进行现场保护之后均运回中国历史博物馆文物保护实验室，继续进行脱盐、脱水等后期保护。

第三节　水底打捞及其他

一、水底打捞的方法

在淤泥层清除、探方布置完毕并进行科学的绘图、照相后可用手清理遗物。

在遗物的清取方面，水下作业有自身的特点(图7.6)。水底沉积一般较疏松，通常不用手铲；某些重要区域可用手轻微煽动。打捞的方法有好几种，一种是用空气打捞装置的吸引力和喷射力将遗物吸取。这种方法对贵重易碎的物品、木船等要十分慎重，有时要禁止使用。一种方法是用气体提升装置，George Bass等人发明了系在气球上提升物体的篮子。对于腐蚀严重、稍一接触即成粉末状的水下遗物，在测量绘图后，在确定无损的情况下，最好的办法是将遗物表面的沉积清除，用石膏将其固定后整体打捞上来。对于深水中的重要沉船，有人建议用巨型抓具打

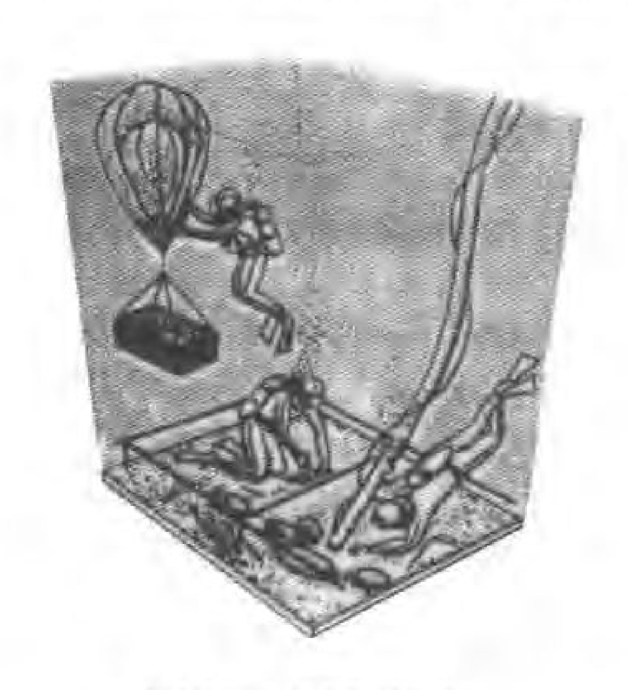


图7.6　水下遗物的提取

左：提起遗物的浮包；中：测量记录遗物的位置；右：搬运沉积物的抽泥机

采自科林·伦福儒、保罗·巴恩著，中国社会科学院考古研究所译：《考古学：理论、方法与实践》，文物出版社2004年版。

捞整个船体①。对于船体构件、火炮等沉重物件，可先用空气提升装置提升至距水面约1米处再打捞。铁在水中易变质生成化合物，并粘连周围的沙、动物遗骸等逐渐变得坚硬无比，打捞时要尽可能将铁质凝结物全部打捞。

无论使用哪种方法，打捞时应尽量保持遗物上附着的氧化层，这些氧化层极有可能是遗物的保护层，留待以后陆地工作时再清除复原。

打捞时，切忌每次作业过深，以免损坏遗物。

遗物浮出水面要经波浪、水流的冲刷，还要经运输的颠簸，理想的做法是在水下装箱，并在箱内填充泥沙，盖好，运至研究室再开箱取物。实际上，自水下考古工作以来，基本上都对打捞上来的遗物及时做了保护处理工作。过去曾有因出于保护的目的在做了一番研究后，将遗物重新淹埋。

二、水底打捞实例

随着科技手段的进步，世界各界人士都对水下考古工作关心起来，一些国家已研制出各种遥控式机器人，以便能深人深海操作。在我国，中央电视台曾对云南澄江抚仙湖水下考古进行了现场直播，引起社会的广泛关注，下面介绍一下抚仙湖的水下考古工作。

抚仙湖位于云南澄江、江川、华宁三县间，距昆明60公里，湖面积212平方公里，最深可达155米，平均水深87米，透明度7.8米。抚仙湖属云南高原第三纪抬升过程中形成的断陷型湖盆地之一，在云南民间世代流传关于抚仙湖“水下古城”的许多传说，但史料中却没有找到有关文字记载。

1992年5月，潜水探险者耿卫在抚仙湖潜水时发现一些有人工痕迹、类似石板的东西。此后，他又几次潜人湖底，又发现石条和类似台阶状的石级，这使他相信水下可能存在着沉没的古代城镇。2000年11月他又发现一处古代建筑遗址，这一消息轰动了世界，抚仙湖“千古之谜”的古滇聚落群引起社会各界的关注。

2001年3月，云南省有关部门首次对外披露，抚仙湖底确实存在规模宏大的、具有一定城市功能的古建筑群遗址，可称中国的“庞贝古城”。此前，北京大学城市与环境学系历史地理学家于希贤教授等人乘坐潜水器下潜到抚仙湖底，经过实

① Bascom W. A Tool for Deep - water Archaeology. I. f. N. A. 1972, 1:180 - 184.

地考察，初步判断这片颇具规模的古滇建筑群是古滇文化时期的城市遗址，是在大约2000年前的一次巨大自然灾变中沉没湖底的。各类建筑均采用石质，其加工水平和建筑规模表明该聚落具有较高的文明程度。聚落区内的房基、石板道路及规整墙体，显示出已初具城市功能，在我国现存远古建筑中实属罕见。

2001年5月，国家文物局批准这一水下遗址的正式考古调查和发掘，为此集合了中国考古、历史、古建筑、地质、地震等相关领域的专家。这是我国考古史上首次进行的湖泊水下考古，也是我国考古史上首次实施对水下建筑遗迹考古调查和首次用机器人进行考古工作。

2001年5月，中国科学院和哈尔滨工程大学的声呐专家们对湖底进行了声呐测量，绘制出了地貌和高度图、遗迹平面草图（图7.7），帮助考古队员了解湖底的地形地貌、水深数据等。

6月3日，抚仙湖水下考古活动开始，同时中央电视台进行现场直播，这是首次水下电视直播。当时抚仙湖湖面波浪起伏，透明度适中，8时8分，用于考古的深潜器——白色的"鱼鹰一号"下水，该潜器重达14吨，考古人员在里面通过潜器上配备的水下探测系统和声呐系统进行探测。10分钟后，考古队员跳离考古船，潜入湖底到达考古现场。考古队员们迅速用不锈钢管建"探方"以建立坐标系统，并在不锈钢管上每隔20厘米，用红色胶布做一记号，以便水下辨识。同时用水下摄像机、防水绘图纸、特制的照明灯等水下专用器具对湖底测量。

半小时后，用于水下考古的小型机器人"小金鱼"入水。这台机器人系我国自行设计研制，可深入到考古队员无法到达的100米深处作业，通过"缆控"（即两根操作杆），可代替考古队员完成一些水下近距离考察工作；同时能同步地将水下的状况实实在在地传送给水面上的监视器。由于采用先进的CCD水下摄像机和合理光谱的照明灯，在水下100米深处都能得到清晰的图像。图像叠加有文字说明的参数，如年、月、日、时间、深度、方位角等，看起来非常直观。

考古作业长达3小时，人们能通过水下摄影机陆续地看到发掘的石条、石块、陶釜等实物画面。绘图照相后，工作人员用绳索和气囊处理等方法将遗物打捞上来。

考古队员还发现了古城的一段城墙，找到了一块当时广场铺路的石板。中国水下考古队还采用先进的水下探测仪器，对这一水下古遗址进行了初步的测绘。测绘结果表明，抚仙湖底的这片古遗址南北向长约2 000米、东西向宽约1 200米，总面积达2.2平方公里。规模极为宏大、壮观。这种大面积的水下古建筑遗址，不

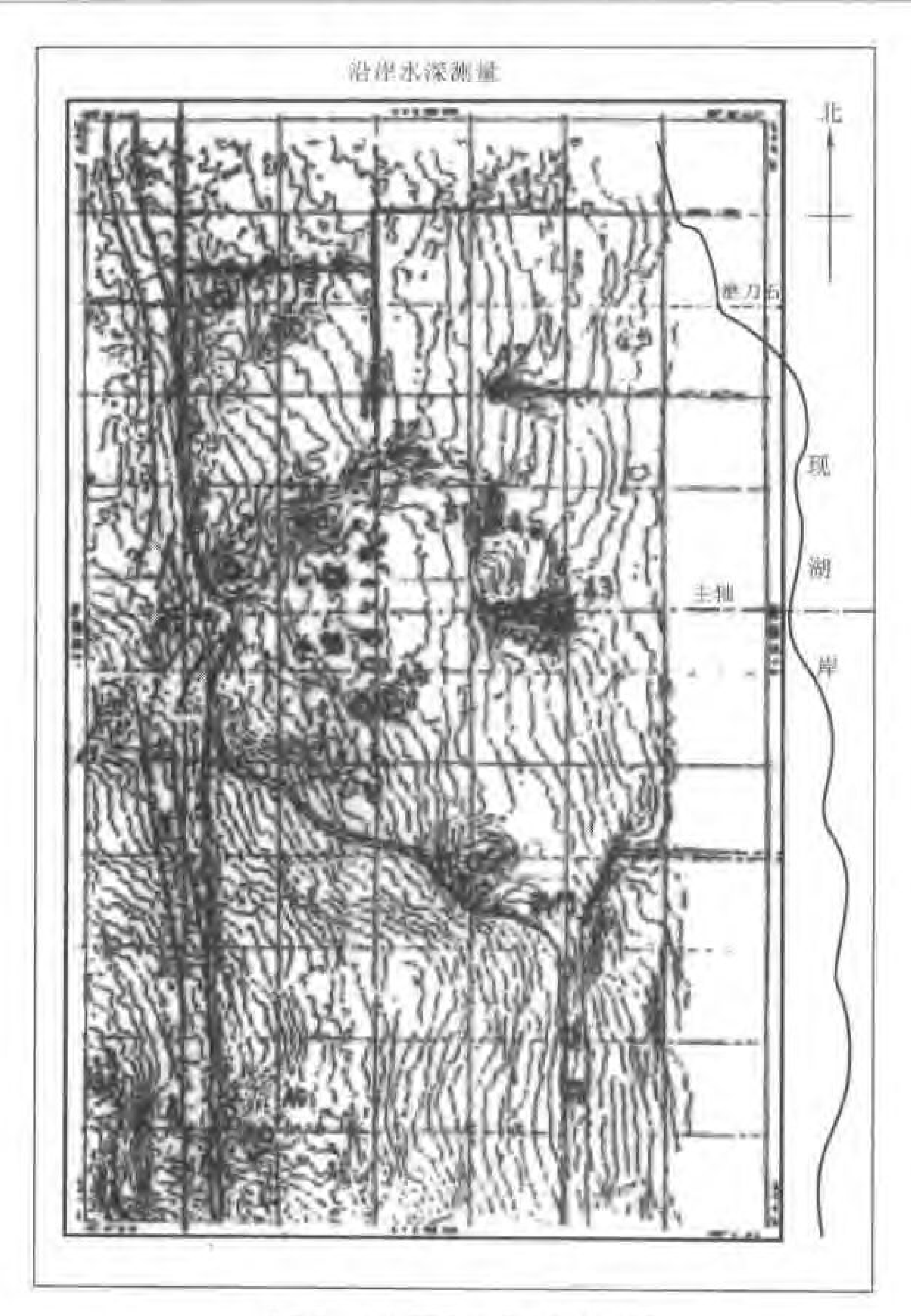


图7.7 抚仙湖底古城遗迹平面图

采自杨鸿勋：《抚仙湖水下考古勘察的初步收获——高科技显示湖底古城遗迹》，《中国文物报》2001年7月11日第7版。

仅在中国，在世界上也十分罕见。

经众多专家初步推断，抚仙湖水下确实存在一个古建筑遗迹，可能系一古代城市。经采用放射性手段初步测定，这座古建筑遗迹的年代可能距今1 750年左右。至于古城沉没之谜，一种可能是因地震而突然沉降，另一种可能就是因地质沉陷而导致的渐次下沉，最终完全被水吞没。第一种说法似乎更具说服力。

最后需要说明的是，水下考古在不断引起人们注意的同时，提高对水下文物的保护意识以及制定保护法已不容忽视。水下的文物如古代沉船中的货币、商品、生活用具对考古专家非常重要，可用来研究古代的生活状况、造船水平、航线变化、文化交流等诸多方面的内容。可文物贩子却用它来发财致富，把完好的文物高价出售给一些附庸风雅之人，把破碎的文物则做废品卖掉或扔弃，致使文物的学术价值流失殆尽。最令人憎恶的文物盗掘事件要数1969年迈西那海峡海底的沉船，渔民和潜水员进行了盗掘，并把嵌有铭文的金块切碎。除了盗掘外，渔民们也经常会无意识地破坏文物，他们的拖网尤其是铁框的焊有齿状的拖网会破坏水下的文物，特别是那些保存状况不太良好的遗物损失更大……许多国家都意识到了水底遗物正在遭受浩劫，制定了相关的法规，积极采取保护措施，如海上巡逻等。对于深海中的遗物目前暂时不发掘，因为在长期的平衡系统中古代文物已得到了保护，待日后保护措施完善时再作发掘。

思考题

1. 简述水下考古的特点。
2. 如何制定水下考古方案？
3. 试述水下探测的方法。
4. 水底打捞主要采用哪些方法？

第八章
考古发掘中文物的采集与保存

在考古发掘过程中,无论是地下的埋藏环境,还是出土时的地上环境,文物所面临的损害都十分复杂。如果我们对考古现场出土的文物进行了有效的保护,那么就可以最大限度地保留出土文物本身带有的各项信息。因此,在考古现场的文物保护,其主要任务就是:在文物出土的过程中,在保留出土文物资料完整性和不影响后续保护处理及考古研究的两大前提下,尽可能地减少环境对出土文物的影响;采取及时有效的措施,对出土文物进行稳定性处理,使得发掘出土的文物在出土现场,得到妥善的保护。由此可见,将文物的物质实体、人文信息及历史遗迹完整地保存下来,就是考古现场文物保护的主要目的。

考古现场文物保护是整个文物保护处理工作的第一步,它的成功与否直接影响着以后的文物保护工作。与实验室内文物保护条件相比,考古现场的工作条件比较简陋,加上必须与田野发掘配合进行,因此,目前很难对出土文物进行十分周全的保护。也就是说,考古发掘现场的保护工作是属于抢救性的、临时性的工作,它要为今后进一步的保护打下坚实的基础。现阶段我们通常采取的工作步骤是:科学地采集、安全地运输和妥善地保存。

第一节　考古发掘中文物的采集

随着考古发掘工作的不断拓展,在考古记录完成后,对出土文物进行采集就是必然的了。但是,从文物出土到被采集之间是有一定时间过程的。在此期间,文物

面临着从地下埋藏到发掘出土后的环境突变。要了解这种环境突变给出土文物带来的危害，就必须了解被发掘文物在地下与埋藏环境形成的平衡体系，以及文物出土时与大气环境建立的新平衡体系。

一、考古发掘前地下文物与埋藏环境形成的平衡体系

按照文物组成材料理化性能的不同，我们通常将文物划分为无机质类文物、有机质类文物和复合类文物。无机质类文物一般有：金属类的金、银、铜、铁、锡、铅器，石质类的石雕、石刻、玉器，陶瓷类的陶器、瓷器、玻璃等。有机质类文物一般有：竹木漆器、纺织品、纸张、皮革、骨角器等。复合类文物有壁画、泥塑、彩绘陶器等。

文物在被埋藏之前，通常已经与当时的大气环境有过一定时间的接触，形成一定的表面状态。不同质地的文物，在埋藏之前的情况各不相同。例如无机质类文物中的金属类文物：如果是长期使用的工具或兵器，就会形成打磨光滑的表面；如果是经常使用的炊具，就会在表面形成一层比较致密的氧化膜。而有机质类文物情况就比较复杂：长期使用的，通常都已经老化腐朽；作为陪葬的，多数还是崭新的。无论它们在埋藏前的状况有何不同，在埋藏之后，它们都要与埋藏环境建立新的地下平衡体系。

不同地区，由于地理环境与地质条件的不同，文物的埋藏环境也各不相同。即便是在相同地区，文物不同的埋藏方式，其埋藏环境也不相同。另外，在土壤埋藏环境中，土壤的腐蚀能力与土壤的通气性（含氧量）、含水量、温度、电阻率、可溶性盐种类与数量、pH 值、有机质与微生物的存在等因素有关。因此，埋藏环境对文物腐蚀的影响十分复杂。文物与埋藏环境建立的平衡体系，必须根据埋藏环境土壤、水质、微生物等多项分析来确定。只有这样，我们才能从中推论该地层出土文物的腐蚀类型与腐蚀程度。

土壤环境中对文物影响比较大的因素通常有：通气性（含氧量）、含水量、pH 值，它们决定了土壤中其他影响因素对文物的腐蚀作用，也决定了文物在地下埋藏过程中的寿命。

文物在地下埋葬的初期，会与周围土壤环境进行部分或全面的接触，开始一系列的腐蚀反应，如有化学类的氧化反应、电化学反应、酸碱反应、水解反应，还有生物类的破坏与侵蚀等。就算地下相对湿度、温度等微观环境变化比较缓慢，含氧量

也会逐渐耗尽；另外，大多数文物本身也会形成一层致密的腐蚀层，阻止反应的继续进行。因此，在一段时间之后，文物与地下埋藏环境的相互作用就会达到一个相对平衡的状态，形成一个地下文物埋藏环境的平衡体系。

例如，湖南长沙马王堆汉墓出土的长沙国丞相利苍的夫人辛追尸体及其纺织品之所以保存得非常完好，主要原因就是深埋、长期密闭、缺氧封存，使文物一直处于相对稳定的平衡状态。图 8.1 是湖南长沙马王堆汉墓出土的素纱禅衣。再如，西北干燥地区，由于气候十分干燥，有机质文物会在埋藏初期迅速脱水，使地下文物处于一个相对稳定的干燥环境中，其各项腐蚀反应很难进行。因此，在新疆、甘肃一带经常出土完好的古代丝绸、竹简木牍、干尸。如图 8.2 所示，新疆且末扎滚鲁克墓出土的男尸，可以看出保存的完好程度。



图 8.1　湖南长沙马王堆一号汉墓出土素纱禅衣

与此相反，有一些地区很难形成地下埋藏环境的平衡体系。主要原因是：其土壤的通气能力一直存在，不能做到隔绝氧气；土壤含水量也会随着地下水活动或大气降水而发生相应的变化，文物随着含水率变化而反复进行着膨胀与收缩的变化；地下微生物与昆虫的活动也在不断进行着，文物一直经受着它们的侵蚀。在这样的埋藏条件下，多数埋藏文物会被深度腐蚀，甚至被完全腐蚀殆尽。例如在中原地区的墓葬中，很少出土比较完整的有机质类文物，如丝绸、竹木漆器、尸体，有时连



图8.2　且末扎滚鲁克墓出土的男尸
采自天山网2003年1月16日，北京娱乐信报记者王健摄影

尸骨也被腐蚀光了。这些都与平衡体系的不能建立有直接关系。

由此可见，平衡体系对于地下埋藏文物非常重要。但是，在考古发掘过程中，随着文物埋藏环境一层层地被剥离，这种多年建立的平衡体系将被无情地打破。文物将面临新的保存环境，面临新的环境腐蚀，我们称之为环境突变。

二、地下文物出土时的环境突变

文物在出土前后是必然要经过一次存在环境的改变的。这种改变的大小与其地下环境与地上环境的差别大小有直接关系。

文物在地下环境中，经过了一段时间的被腐蚀与抗腐蚀，逐渐与地下埋藏环境建立了一种平衡体系。地下埋藏环境基本上是一个大的缓冲体系，其明显的特征就是温、湿度变化缓慢。地下环境中，在没有地震或其他地质变化的前提下，文物整体的物理性能是比较稳定的，没有明显的张力变化与体积变化。

地下文物的化学性能就没有物理性能那么稳定了。地下水与其中所含有的可溶性盐类，在地下文物的内部不断地渗透、溶解、蒸发、结晶，这样对多孔结构的文物影响比较大，如陶质类文物就会出现酥粉现象，有时还会形成陶器表面沉积膜。在多种因素的影响下，地下埋藏的有机质类文物也一直在进行着老化反应。在老

化中，有机化合物大分子之间的作用力会慢慢地失去，纤维素的分子链也会逐渐地断裂、水解，蛋白质分子出现降解等，如纺织品文物的腐烂、粉化。不仅如此，地下埋藏的金属文物也会被慢慢地矿化，失去原有的金属性能，如青铜器、铁器因为矿化而变得整体脆弱、易断。

虽然如此，千百年之后，文物在地下形成的平衡体系，使其在地下埋藏环境中的腐蚀速度变得越来越慢，有的甚至可以认为已经停止了腐蚀。其外观通常没有多少改变，在出土时的初期，仍然能够看到当年埋人地下时的风采。

但是，在文物出土的同时，迎接它的地上环境与地下埋藏环境却是截然不同的。

首先，文物面临的是含氧量丰富的空气。文物与地下环境形成的氧化还原平衡体系被打破了，文物开始迅速地进行氧化反应，这一点对于有机质类文物尤其明显。

其次，是地上环境中温、湿度的大幅度、频繁的变化。相对于地下埋藏环境，每天的日出日落，冷暖交替，地上环境一天的变化犹如地下环境一年的变化。

通常空气中文物含水率明显低于地下埋藏时的文物含水率，所以，出土文物所含有的水分，会在短时间内大量蒸发流失。并且，这种流失在文物的不同部位是不均衡的，从而导致文物各部拉体积的干缩不均衡。因此，地下出土文物经常会出现快速干裂、变形。

再次，光线的影响也是非常突出的，地下环境没有光线，不存在红外线和紫外线的影响。文物出土后，直接面临阳光的光分解、光氧化作用，导致出土文物的各项化学变化加速。例如有机质类文物和带有彩绘的文物，经常会发生质地材料颜色加深，表面彩绘变色、褪色现象。

最后，面临的是地上环境中各种生物类的危害。空气中飘浮有大量微生物的孢子、植物的种子、昆虫的虫卵，有的可能是在地下埋藏环境中本身带有的。在地上环境的条件许可下，它们会在出土文物表面很快地滋生，给文物带来很大的伤害。

总之，文物在地下经过千百年的埋藏，化学性质虽然有了一定的变化，但它们与埋藏环境已经建立了某种平衡，还能较好地保持其原有状态。一旦发掘出土，这种平衡状态迅速被打破，各项因素的变化给出土文物的承受能力带来巨大的考验，如果这个变化超出了它们的承受能力，文物将受到明显损害，所以在考古发掘现场

进行及时的稳定性处理与保护是十分重要的。

三、考古现场文物采集时的稳定性处理与环境控制

文物在发掘出土到被采集期间，面临着环境突变给它们带来的危害。为了减少出土文物在此期间的损害，我们应对其进行稳定性处理与考古现场环境的控制。

（一）文物出土时常见的病变与稳定性处理措施

在考古发掘中，有时会出现某些文物在很短的时间内发生很剧烈的变化，甚至毁灭性损坏，这种现象越来越受到考古工作者的重视，目前已成为文物保护研究的重点课题。按照考古发掘出土时文物抵抗环境变化的能力，我们将文物分为普通文物与脆弱文物。脆弱文物就是出土时常常出现病变、急需稳定性处理的文物。

常出现病变的文物，主要集中在有机质类文物。由于其自身的脆弱特性，决定了有机质文物极易受到腐蚀侵害。目前常见的主要有：木质纤维类文物，如棺椁木、木质器具、木牍、竹简；纺织纤维类文物，如丝、麻、棉、毛织品；纸质类文物，如文书、字画；其他还有漆器、皮革、尸体、骨质文物以及象牙制品等。在无机质类文物中，也有少数文物容易在出土时受到损害，如彩绘陶器、铁器等。在经历了千百年的埋藏之后，由于各种文物组成材料的自身性状，它们已发生了一定的腐蚀变化，加上出土时的环境突变，必然会出现各种各样的病变。

有机质文物有一个共同的病变，就是微生物对其的侵害。在埋葬过程中，有机质文物被水解、降解导致结构酥松，并且富含大量微生物营养源，因此，出土时微生物生长十分容易，极易发生微生物侵蚀。这种病变大大降低了有机质文物的力学性能与耐腐蚀能力，也为日后的文物清理、修复与保护带来很大麻烦。在考古发掘的过程中，由于发掘地点的环境气候条件与发掘季节、持续时间的限制，除了对考古工地土遗址的表面要做防微生物生长的防疫处理外，考古现场出土的有机质文物在采集提取之前，也要及时做好微生物防疫处理，通常最简单的办法，就是定时喷洒含有一定杀菌灭生作用的消毒剂。

有机质文物中的竹、木、漆器的病变：这三类文物均以木材为主体，木材由植物细胞构成，有孔隙，它主要由纤维素、半纤维素、木质素组成。纤维内含较多的亲水基因，易导致木材的膨胀、收缩；而且半纤维素的化学稳定也小。此外，木材的本身结构有各向异性，不同的木质方向其吸水率、脱水率也不同。由于长期受地下水及

其他有害物质的侵蚀，其组成中的纤维素、木质素等都受到一定程度的破坏。在地下环境中，大多数地区的木质文物基本上处在一个比较恒定的环境中，由于自身的吸水性，其含水率一般比较高。在发掘过程中，环境（包括温度、湿度、气体、光线等）有了突变，环境差异导致的失水太快会给它们带来变形、起翘、皱褶、开裂等病变。例如，出土的饱水竹简，在空气中放置一小时后，便会出现收缩、起翘现象。还有饱水漆器出土后，如不及时采取保湿措施，会很快脱水皱缩、变形。这就需要我们在考古发掘现场注意控制木质文物水分的散失速度。通常根据发掘进展和采集先后步骤，可以采取定时喷洒含有杀菌功能和脱水定形作用试剂的水溶液来补充文物的水分含量；也可以针对出土的木质文物制作特殊的小环境，控制湿度，防光、防虫、防霉，减少文物出土时环境的差异，稳定木质文物的物理化学性能。

西北干燥地区的竹木漆器的现场清理、揭取与潮湿环境下有所不同，这种环境下保存下来的漆木竹器强度要比在潮湿环境中出土的同种材质好。揭取可以用托板法直接托取。

纺织品通常由植物纤维（棉织品和麻织品）或动物纤维（丝绸和毛制品）组成，植物纤维中的纤维素易发生水解，动物纤维中的蛋白质易发生酶解和降解。由于在埋藏环境中，通常是贫氧状态，而发掘时出土文物被空气迅速包围，氧化反应急速加快，自由基类的炭化反应随之出现，有机纤维炭化在所难免。除此之外，长期地下高湿、厌氧的环境会给纺织品带来水解、降解作用，出土时纺织品普遍已经糟朽，不堪提取，这给文物采集带来很大的困难。

在考古发掘现场，如果有纺织品文物出土时，应想办法及时将其整体转移到室内，在避光、低温的环境中进行揭取。避光是因为纺织品中的丝纤维对紫外线很敏感，会发生光氧化降解，使之断裂；织物上的染料也会加速氧化褪色。低温则是为防止织物出土后发生霉变。出土时漂浮在水中的织物，一般可用纱网托捞提取，放室内避光处缓慢干燥。如果是棺材内有纺织品，且棺内有积水，应先将水放掉，否则棺内织物在搬动过程中会因水的晃动而发生位移。

纺织品揭取要掌握好揭取时的干湿程度。如果在饱水状态下，纺织品几乎没有机械强度，状如烂泥。如果纺织品含水率过低，也不适于揭取，因为在湿度过低的情况下，织物纤维细胞壁很脆，机械强度很差，无弹性，不耐折、压。这时揭取，也会造成织物断裂，甚至成粉末状。因此在揭取出土织物时一定要掌握好干湿度，将织物用卷曲的方法，按顺序由上而下进行揭取。穿在尸体身上的衣服，由外向内一

层层的用卷曲的方式进行揭取，展开。用卷曲的方法是为了使织物受力均匀。对粘附于棺椁上的薄质织物，可用湿强度好的纸张，均匀刷上浆糊，贴于织物上。略干后，揭取下来。再用揭裱字画的方法去纸后，装裱保存。

在地下环境干燥的新疆地区，这个问题就少多了。西北干燥地区古代纺织品是干燥埋藏，干燥出土。这些长期埋藏在干燥条件下的织物，一般都保存比较完好，也易于揭取。例如，在新疆沙漠地带民丰的尼雅、楼兰，吐鲁番阿斯塔那等地所发现的汉唐丝绸，这些遗物的保存大都比较好，纤维还具有相当好的强度，颜色也鲜艳。不过，在揭取过程中应该注意过于脆弱的纺织品不可以卷叠，防止纤维断裂，揭取后放入干燥剂以保持其原有的干燥环境，注意避光保存。

考古现场出土的纸质文物的保护问题是十分棘手的，纸质文物的保护比其他有机材料的保护要求更高。在考古发掘现场的纸张，由于在地下埋藏时间长，本身已经降解、破坏严重，加之地下土壤中微生物的孢子附着，出土后伴随环境的改变，会失水、长霉，失水后的纸张最终只会灰飞烟灭，不复存在，侥幸保留下来的也是面目全非，无法辨认。因此在考古发掘现场对纸张进行第一时间的抢救保护是十分关键的。

在潮湿地区，考古发掘现场的纸质文物的揭取保护，与纺织品的现场揭取、保护方法类似，关键问题在于现场出土文物的保湿。纸质文物的工作要求更加细致小心。对于难以在现场直接清理的可以进行整体揭取，保湿运回实验室，进行微型发掘整理。

对于干燥地区出土的纸质文物，由于其出土时含水量已极低，纸张仅保留形状，在揭取过程中，应该保留其原形不变，放入备好的容器中，容器加盖，内放干燥剂，保持纸质文物存放环境与出土环境相似。

考古发掘中，皮革类文物比较少见。已见出土的有皮甲胄和皮囊，还有一些物品的附件和装饰。皮革的结构是由胶原纤维束在三度空间纵横交错编织而成，是一种特殊的立体网状结构，具有较高的机械强度。皮革主要组成是胶原蛋白质，含有 19 种氨基酸，也含有一定数量类脂化合物，其化学成分包含蜡类、磷脂类、固醇类及脂肪酸类。皮革是一种多肽结构的网状组织蛋白质纤维，其本身的化学性质和结构、制革的工艺和技术等决定了皮革的保存状态。只有在一个稳定的地下埋藏环境中，皮革才能保持到现在。在埋藏中，皮革的物理化学性能已发生极大的衰变，一旦出土，就会迅速地硬化、皱裂、变形，此外如果是在湿润环境下出土，皮革还

容易产生霉变，应当尽快揭取并密封、避光保存，或用甘油、液蜡等适合材料将它们封护起来。

考古中发掘出来的古尸并不多。到目前为止，保存下来的古尸主要有鲜尸、干尸、尸蜡、鞣尸。1972年长沙马王堆一号汉墓出土的女尸，是我国迄今出土的最完好的尸体，类似一具鲜尸，这是考古史上罕见的，具有重大的研究价值。干尸又称木乃伊，是处于干燥的环境中，脱失体内水分，或用防腐剂人工制成的。例如，图8.3所看到的新疆铁板河古墓出土的一具保存良好的女性尸体，面目清秀，神态安详，鼻梁高窄，眼睛深凹，口微微张开，胸部、四肢肌肉丰满，毛发、皮肤、指甲都保存完好，甚至长长的眼睫毛都清晰可见。深褐色的头发蓬松地披在肩上，皮肤呈古铜色，身体强壮。根据人类学研究和骨骼系统X光照相分析，此古尸是新疆古代的少数民族，年龄在40～45岁之间，身长152厘米，体重10.7千克。

尸蜡是在空气稀薄，环境润湿，水土含钙、镁量多等条件下，尸体本身由于多脂肪而形成表面似蜡的尸体。鞣尸是由于在周围酸性水土中，尸体骨质脱钙软化而形成的皮革状尸体。由于人体中的蛋白质、脂肪等均是细菌生长的丰富营养物质，当人死亡后，寄生的各种细菌便在适宜的温、湿度条件下迅速繁殖。尸体腐烂的过



图8.3 新疆铁板河古墓出土尸体

采自新华网2004年5月31日。

程,实际上就是细菌在尸体上生长繁殖的过程。在地下特殊的埋藏条件下,考古发掘时能够出土以上几种尸体。而出土时的周边环境肯定与其埋藏环境大为不同,因此出土时环境的变化,势必会给尸体带来巨大的损害,如干尸的吸湿霉变、鲜尸的再度腐烂、尸蜡的氧化与干裂、鞣尸的硬化霉变。由于考古发掘中出土的尸体稀少难得,考古现场必须要有预备方案和临时处理的措施准备,如对于干尸,可经过消毒后置于干燥处密封保存;而对于鲜尸、蜡尸或鞣尸,则需在尽量短的时间内放入含有防腐剂溶液的容器中临时保存。

考古发掘中,骨质文物及象牙的损坏,除了常见到的破裂、糟朽、粉化等现象,还有骨质矿化造成各部位膨胀系数差异而形成的崩坏。骨和象牙都是由无机物质和有机物质复合组成,其中无机物质大都是磷酸钙和一些碳酸盐及氟化物。磷酸钙是构成骨和象牙的主要成分,这种物质使它们具有很好的抗裂、抗压、抗折等机械性能。构成骨和象牙的有机物质是骨蛋白和油脂类物质,它们约占总重量的30%。骨和象牙都是各向异性的,当遇热和受潮时,容易发生翘曲。骨蛋白及填充于骨内的油脂类物质,很容易受到氧化和水解,同时也容易受到细菌的侵蚀和破坏。

地下的酸、碱类物质不仅使骨蛋白和油脂变质,而且还会破坏骨的无机成分,使骨质完全酥化。由于骨组织具有特殊的细胞腺,孔隙多,而且易被污染,所以出土时经常发黄或变黑。在地下长期埋藏,受到盐和水的侵蚀,骨的无机物质大部受到破坏,变得非常脆弱。若骨中的有机物质逐渐被矿物盐类,特别是二氧化硅(SiO_2)和碳酸钙($CaCO_3$)所代替时,骨质矿化,天长日久,骨质便形成化石。在考古发掘中,常常会遇见到表面看来似乎是很完整的骨头,但拿不起来,甚至触之即碎。这就是因为骨的结构已经被破坏,骨中的有机物质消失,甚至有的无机物成分也已破坏。图8.4是象牙及野猪獠牙暴露在空气中一段时间后的干裂、酥粉状况。当遇到这种情况,一般可采取连周围的土一起提取的方法,也可采用加固取回,再清理修复。对于在考古中发掘出的极脆弱骨质文物,为避免搬动过程中发生意外,应立即进行现场加固。若骨质比较干燥时,可用5%的聚乙烯醇缩丁醛溶液涂刷或喷雾,进行渗透加固。若骨质比较潮湿,可用浓度尽量稀的聚醋酸乙烯酯乳液或丙烯酸酯乳液渗透加固。

在考古现场出土的象牙失水后会粉化成为一堆粉末,我们应该像处理饱水状态下的其他有机材料一样,发现后及时揭取,并用带有保湿措施的箱子尽快将象牙



图8.4 暴露在空气后干裂、酥粉的象牙及獠牙

制品运回实验室存放，运输过程中要注意防震。对于象牙容器，由于属于一种空腔的器皿，所以保存状况会更差，出土时大都已被压成碎片，或一层层剥裂，因此对于它们的采集就需要采取一些特别的措施。

在无机质类文物中，也有一些容易在出土时出现病变的文物。

彩绘陶器出土时，其表面的颜料非常容易与附着土粘在一起剥落，或在干燥过程中粉化掉色。陶器表面的颜料多为无机矿物颜料，它们通过调以适当的动、植物胶（如鱼胶、骨胶、桃胶等），绘在烧好的陶体上。在出土前，彩绘陶器一方面随着陶体膨胀收缩而变化，另一方面颜料中的胶结材料也在随着时间慢慢老化，失去作用。失胶的颜料在地下可溶性盐类的活动下，慢慢开始粉化。因此，很多彩绘陶器在出土时，随着陶器含水率的快速降低，容易出现掉色现象。这种情况一般需要在考古现场进行湿度保持控制，并在彩绘清理过程中对彩绘层进行一定的加固处理。还有一些器物表面在出土时包裹了大量的黏土，这些黏土在器物表面形成了比较结实的"被壳"，随着考古发掘，其表面开始干燥，"被壳"也会随之出现龟裂、剥离，并且带下整片的彩绘，所以要保持其湿度，利用无水酒精具有的松动土壤的能力，配合使用竹签小心剥离彩绘层上面的泥土。图8.5是咸阳汉阳陵考古发掘出土彩绘裸俑的现场照片，由于采取了现场发掘与保护处理相结合的工作方针，使我们可

以清楚地看出这批裸俑在入土时的情况：裸俑当年都是穿有甲胄或布制衣裳的，本来也应双臂俱全，但因为手臂是木制的，早已和衣裳一样炭化了。

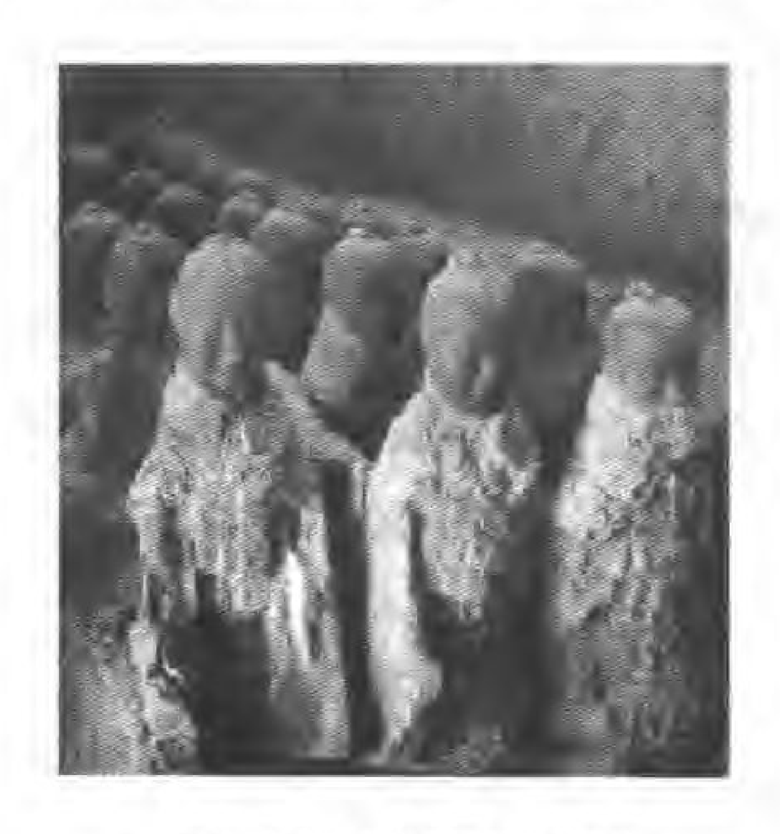


图 8.5 汉阳陵带有铠甲的彩绘裸俑

古代铁器一出土就面临着快速生锈腐朽的问题，尤其是在地下已经生锈的铁器，一般糟朽严重。因而在考古发掘现场对铁器进行必要的保护十分迫切。

铁器是铁与碳的合金，铁器的组成成分的差别、含碳量的多少、熔融温度的高低、冷却速度的快慢、锻打次数的多寡，以及器壁薄厚等各个方面因素，导致了铁器具有不同的化学、物理性质；而且古代的铁器无论生铁、熟铁，其结构都带有微孔和腐蚀通道，这些是铁器腐蚀的内在因素。

铁器的腐蚀主要是铁和氧气、氯化物、水、硫化物之间发生的反应。腐蚀层中的渗碳体残余说明腐蚀除化学腐蚀外，还有电化学腐蚀。当器物埋于地下时，还有细菌腐蚀，诸种腐蚀同时发生于铁器，因而地下的铁器会受到不同程度的侵蚀。在考古发掘过程中，当铁器出土的外界条件适宜，如含有水分、氧气、灰尘等，都会使

铁器在出土后继续腐蚀。因此,铁器出土后的第一保护步骤就是强制性干燥处理。

通常在发掘现场,铁器文物在出土后不能迅速离开现场。铁器一方面与土壤接触,另一方面与空气接触,在这种条件下,铁器的腐蚀速度会加快,因此,在发掘现场,应该及时提取铁器,并迅速进行干燥处理,放入密封带有干燥剂的容器中。

在漫长的地下埋藏中,文物均有一定的腐蚀,有些甚至会腐蚀殆尽。因而,在考古发掘工作中发现的得以幸存下来的文物就显得珍贵和难得。这一点要求我们尽最大的可能科学地采集、正确地提取,使之能够留存下去。

(二)环境控制的重要性与常用措施

文物经过考古发掘过程,经历了从地下到地上的环境突变,并且在这个突变过程中,出现了不同程度的病变。目前,我们没有能力去改变文物原有的地下埋藏环境,只能并且一定能够做到的是:控制发掘现场的环境,减少文物出土前后的环境差异,从而将环境突变带给文物的伤害降到最小。做到这一点对于出土文物的后期保护工作十分有利。

在考古发掘现场,我们应该从出土文物含水率的保持、空气环境温湿度的控制、微生物的防疫、灰尘与有害气体的预防等几个方面入手,做好考古现场环境控制工作。

1. 文物含水率的保持

对于出土的有机质文物而言,水分的流失速度对其形态的改变有很大影响,而湿度大又会带来潮湿环境下的病变,这个矛盾是考古现场应该重点解决的问题。水的来源主要有降水、地下水、毛细水和空气中的水分。在考古现场,对降水的预防一般都能做好,通常是建保护大棚。如图 8.6 和图 8.7 所示,老山汉墓考古现场就建有保护大棚。要控制文物水分流失的速度,就要严格控制考古现场空气中的水分,而控制空气湿度就必须掌握好保护大棚的密闭性与通风性能的平衡,做到这一点是十分困难的,但却十分重要。

在发掘过程中,地下水和毛细水是我们需要面对的主要因素。文物绝大部分时间是与土壤直接接触的,而且有很多墓葬、遗址距地表往往较深,地下水的活动也比较明显。地下水的活动对文物的危害很大,可溶盐的运动会给文物带来酥粉性的破坏;在潮湿条件下,霉菌、地衣、害虫得以滋生。因而,对地下水活动的综合治理,对土遗址土层表面的防疫处理是现场保护的关键问题,也是难点所在。

2. 温湿度的控制

对处于一个相对封闭环境中的温湿度控制，工作相对要简单一些，利用安装的空气调节装置，进行日常温湿度监测与调节。对于条件比较差的工作环境，就必须结合当地气候条件与工作日程来宏观调整，局部微环境作一些简易控制。



图8.6　老山汉墓考古现场保护大棚外景

3. 空气净化控制

灰尘与大气污染对正在发掘的文物是有很大损害的。在考古发掘现场周围，应该尽量关闭大气污染源。对于保护大棚的门窗尽量进行密封性处理，安装过滤网，对空气中的有害气体、灰尘、悬浮颗粒物进行净化过滤，可以长时间保持文物表面的清洁与化学性能的稳定。

4. 发掘现场采光中紫外线的过滤

在考古现场的保护大棚中，通常采光是利用太阳光的射入，而阳光中的紫外线含量很高，对文物表面，特别是有机质文物影响较大。对于保护大棚，我们可以用紫外线吸收剂处理大棚透明部位，减少紫外线。没有保护大棚的发掘现场，就必须采用带有防光涂膜的遮阳伞消除紫外线对文物的危害。



图8.7　老山汉墓考古现场保护大棚内部

四、文物采集的一般方法

考古发掘本身是一个具有损伤性的过程，文物出土对于文物本身是一个十分危险的时刻，这一点主要指的是环境的突变带来的问题。文物在采集过程中，如何克服这个突变，是一个关键性的问题。我们在采集中应尽可能防止温度和湿度的大幅度变化，尽可能保持文物出土时的含水率。在露天发掘文物，还要考虑风沙、雨水及阳光的影响，临时搭建考古现场大棚可以帮助我们解决这个问题。在环境突变的问题可以得到控制的前提下，我们才能随着考古发掘的需要进行文物采集。文物采集的一般步骤是①：

（一）记录

记录要随时进行，这个过程应该贯穿考古现场保护的始终，不仅包括对文物进行的所有的操作程序和步骤的文字记录和照相、录像等音像资料，还包括每天的工作日记。档案记录是出土文物保护修复的第一手资料，记录和保存好档案，能为以后进行文物保护修复工作提供借鉴和帮助。

① 中国社会科学院考古研究所：《考古工作手册》，文物出版社1982年版。

（二）采样

采集的样品包括环境样品和文物样品。环境样品是指从考古现场环境中的土质、水质、墓室内气体等获得的样品。文物样品是指从文物上采集的颜色、漆片、纺织品、金属饰品、粮食颗粒、器物中的残留物等样品。对获得的样品进行科学的分析检测，是考古和实验室保护研究的重要依据。

采样的基本原则是：

（1）所取样品能够尽量满足研究的需要。

（2）要明确样品的层位以及共存的遗物。

（3）尽量选择残器或破损器物不被注意的部位采样，不要对器物纹饰和重要部位造成损伤。

（4）科学保管样品，避免因外界因素干扰，而使之失去科学研究价值。

（三）搬拿

地下文物经过多年的地下埋藏和不断的土壤腐蚀过程，文物本身发生很多的变化，虽然看起来完好，其实却很脆弱。所以搬拿时应遵守以下规则：

（1）必须戴上手套，目的是保护文物不受污染。

（2）拿文物时要小心谨慎，轻而稳。

（3）小件器物应该双手捧着，大件器物应该一只手托底，另一只手扶持，或者双手捧着器物的中下部分，不要提它的口沿和耳部。

（4）纺织品和纤维制品不要折叠，应放在一个托板上搬拿。

（四）提取

提取是指将文物从土里剥离出来的过程，它是文物出土后的第一次移动。提取质量的好坏，直接影响以后的保护修复工作，所以，它是考古发掘现场保护技术的重要环节。

无论采取何种方法提取文物，首先必须考虑提取是否会对文物造成损害或影响。其次必须了解所提取文物的强度。在一般情况下，最好能采取一些措施，对文物进行必要的补强处理，尽可能地保证文物的安全。此外，整个提取过程要做好记录工作。

整体提取主要用在非常脆弱或复杂迹象文物的提取，整体提取一般有箱取法、插板法和托网法。

箱取法又称“套箱法”，是在考古发掘现场应用最广泛的一种方法。是指将需要提取的遗存同周围的土分割开来，然后套上木箱，再将底部掏空，使遗存剥离出来的方法。图 8.8 是箱取法的箱体示意图。

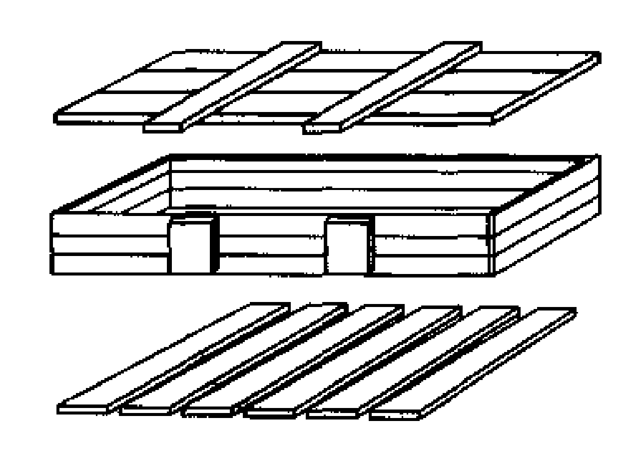


图 8.8　箱取法的箱体示意图

采自中国社会科学院考古研究所：《考古工作手册》，文物出版社 1982 年版。

提取方法可分为背衬法和整体提取法。背衬法主要用于大的片状的文物提取，如壁画的揭取。整体提取主要用在非常脆弱或复杂迹象文物的提取。

以提取人骨架为例[①]，图 8.9 介绍了箱取法的操作步骤：

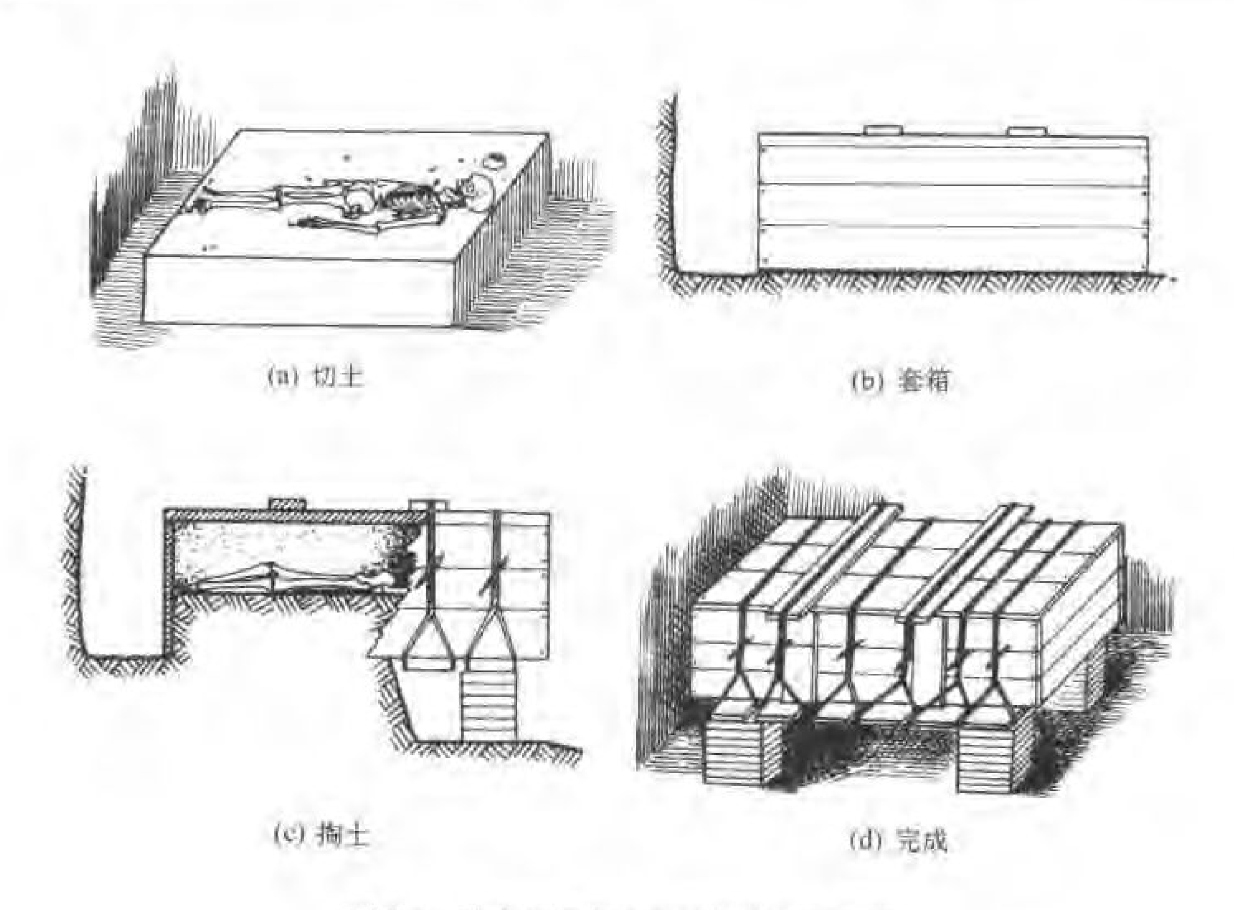
第一步：将人骨架上及墓穴内的填土剔除干净，将手指、足趾等易于移动的小骨骼以及小件随葬品用 502 胶点滴少许以固定。

第二步：沿骨架四周开一道宽深约 20～30 厘米的沟，内边土壁切齐，套上大小适当的木箱框，在骨架上垫一层薄麻纸或铺撒一层细砂土，便于以后清除。然后以潮湿细土填回箱内并稍加压实，加上盖板用螺丝固定住。

第三步：沿木框底边向内平掏，去掉泥土后插入底板。底板由若干宽 20 厘米左右的板条组成，长度略大于箱宽。操作时先掏空两端，插入底板，用砖垫实以防箱内泥土漏出。再依次将底部的泥土掏空，插板。全部底板插满后，用绳或铁丝将各底板与箱体绞紧；绞棍设在两侧，以便拆卸。

插板法：又称托板法，是指在需要提取的遗存下插入薄板，而将欲提取的遗存

① 申茂盛、贾晓燕、盖志浩、张勇剑：《考古发掘现场的抢救技术》，中意合作文物保护修复培训班论文。



(a) 切土

(b) 套箱

(c) 掏土

(d) 完成

图 8.9 箱取法提取人骨架的操作示意图

采自中国社会科学院考古研究所:《考古工作手册》,文物出版社 1982 年版。

放置于板上整体取出,以便回到室内作进一步的清理。插板法通常用于体积较小、重量较轻的遗存,另外当遗存是安置在砖石等坚硬的基础之上,不能采用箱取法时也可以考虑使用插板托取的方式。目前插板法应用最广的就是墓葬中随葬简牍或其他成组物品的清理。过去使用的插板多是木质的三合板或五合板,现在薄板的材质很多,其中具有一定硬度和韧性的金属板或塑料(树脂)板,都可以作为插板来使用。为了便于插入土中,最好将插板的前端制成比较锋利的刃状。

所谓托网法,是插板法的一种变化方式。需要完整起取的遗存,并不是在一个平面上,之下还会有遗存,不宜使用插板的方法,于是在工作实践中就逐渐摸索出托网法。托网法是在需要起取的遗存下面,用细铁丝按照遗存的实际形状逐一插入,最后将这些铁丝编结在外围的粗铁丝上形成网状,则可以托起需要起取的遗

存。托网法的好处在于可以利用较小的缝隙插入承托物，由于铁丝具有良好的韧性，可以随形而曲，这样就可以尽量避免对下面或周边的遗存造成破坏。

五、文物采集后的运输

如何将考古现场取出的文物安全运回室内，也是室外发掘清理工作的关键一环，它包括两个重要环节，第一个环节是包装，第二个环节是运输。

（一）包装

包装应具有物理保护和化学保护的功能。就物理保护而言，我们应该用防震材料包裹器物，以免受碰撞。至于化学方面，则是使用不会释放酸气、不受微生物侵害的非污染性的惰性材料，达到化学保护的目的。聚乙烯是一种非常有用的化学保护材料，不管是聚乙烯口袋还是盒子，密封后都能防止潮气及污染物侵人。通常是将器物装入聚乙烯口袋，然后放到一个硬质的容器里边。包装中要避免使用一切易吸收其他物质引起化学反应的材料，如报纸、印染织物、卫生纸及所有金属材料制成品。

所提取的文物都应该标上登记号，先在标记部位抹上一层可逆材料，通常是丙烯酸树脂溶液，然后写上登记号，最后再覆上一层丙烯酸树脂溶液。另外，文物上面都应具备一张紧急抢救的技术卡片，在卡片上详细地填写器物来源，发掘期间所做的一切操作处理、分析、取样等情况，在显眼的地方标上用以识别器物保存状况的标记，如易碎、在特殊环境条件下保存等。

（二）运输

凡运输文物的工具都应采取一些必要的防震措施，在运输漆木器时更要注意防震。现在的防震材料很多，有条件的可将运输工具底部垫一层较厚的泡沫，然后在泡沫上垫一层海绵，运输工具的四周也应隔一层泡沫。没有条件的可铺一层较厚的稻草或麦草等，只要具备防震功能的材料均可使用。将包装好的漆木器置于事先准备好的防震层上放好后，还必须用海绵将器物与器物之间进行固定，以免在运输过程中造成碰撞而使漆木器遭到不必要的损坏。另外，在运输途中车的速度不宜太快，力求平稳，尽量减少不必要的损失。

第二节　出土文物的清理与修复

考古发掘出土的器物很多带有大量埋藏环境包裹物，并且多是破碎的、残缺不全的。对这些残片进行科学的清洗与修复，可以让艺术品的文物价值、历史价值、艺术价值充分表现出来，便于研究者进行研究，便于博物馆陈列展出，便于人们认识和欣赏古代遗物。

目前，对于文物修复的认识，有两种观点。一种观点认为，文物修复应该遵循最小干预原则，即只要残缺部分不影响文物的稳定性与艺术性，就不必进行修复，尊重其本身的历史信息。另一种观点认为，文物修复应该再现文物的完整性，即只要文物残缺了，就应该进行补全，这样有利于归类、进一步研究文物，体现文物的艺术性。由于上述不同的理解与认识，在实际工作中导致不同的修复原则和修复方法。

近些年，文物工作者一直在讨论文物的修复原则，多数人认可"修旧如旧"的原则。它的主要观点是：尊重文物所具有的历史真实性、科学性和艺术性，尽可能延续文物的生命，最大限度地保存文物的历史信息。修复工作不可主观地去除或改变文物表面的历史痕迹，修复之前必须对其历史性、科学性和艺术性特征进行认真研究，确保修复的效果能体现该文物的原始风貌。

无论学术界如何争论原则性问题，在考古发掘现场出土的文物，随时需要进行采集、清洗、修复。在多年的实践过程中，在"抢救第一、保护为主"的工作方针下，文物修复工作也总结出一些行之有效的方法。

一、出土文物表面的清理方法

由于文物在地下埋藏环境中，长时间地与地下环境因素相互渗透、相互作用，所以，在文物发掘出土时，表面必然带有大量埋藏环境的包裹物，虽然它反映了文物在地下环境中的点点滴滴，但在对包裹物采集取样之后，多余的包裹物，便影响了文物的后期整理、修复、陈列，必须将其清理掉。对于不同种类的文物，因其稳定性能的不同，所采用的清洗方法不可能一致。我们把性能稳定的文物称为普通文物，以之区别那些比较脆弱的文物。

（一）普通文物表面的清理方法

根据文物不同腐变程度及不同部位选择不同的清理方法。目前对于比较稳定文物的清洗可采用清水刷洗和机械法清理，清理时以不伤损文物的特征为原则。

对于性能稳定的文物，如果其表面仅仅是简单的泥土污垢，可用清水毛刷进行刷洗，如没有彩绘的陶器及石质文物表面的清洗。这种方法原本十分普遍地应用于考古工地，但是，随着人们对考古工作的认识提高，目前越来越多的考古工作者改用干法清理文物，最大限度地保持文物的表面信息。

机械清理法是在显微镜下用电动工具去除污垢或者金属锈蚀。它可以控制清洗的范围，目标明确，不伤害非清洗部位的文物信息。经常使用的清洗仪器有超声波清洗机、超声波洁牙机、微型打磨机、喷砂机。

这几种机器是从工业或医疗器械中引进的。超声波清洗机应用压电陶瓷换能器将电能转换成声能，使液槽件液体介质产生空化、机械、热及化学效应，利用这些效应对器物进行浸入式的整体清洗。超声波洁牙机利用换能器产生的超声振动，通过聚能杆将能量集中在工作刀具端部。当手持笔式的工作端部轻触工作面来回摩擦时，即可将工作面上的附着物及锈层迅速粉碎剥离，并由刀具头部喷出的水流带走，达到清洁表面的作用，其工作能量可通过对输出功率的选择随意调整。喷砂机对质地较软、工艺精细的金银工艺器、鎏金器物的处理效果极佳。它利用空压机产生的高速气流，混合 Al_2O_3 抛光微粉喷出，用以清除器物表面的坚固附着物。经喷砂处理后，没有机械清除的痕迹，并有抛光效果。

（二）脆弱文物表面的清洗技术

对于那些比较脆弱的文物，文物的清洗要用特别的方法与工具。下面列出有机质文物中纺织品和无机质文物中鎏金铜器的清洗方法。

1. 纺织品文物的清洗①

纺织品文物的清洗应根据纺织品纤维的种类、组成、结构和性质面定，也与织物的颜色和污染斑点的性质有密切的关系，其清洗的方法可分为湿洗法（水洗）和干洗法（机械清洗或用有机溶剂清洗）两种。

（1）湿洗法

① 中国纺织品鉴定保护中心编：《纺织品鉴定保护概论》，文物出版社 2002 年版。

清洗前应先除去泥土,然后再用水洗,一般常用蒸馏水或雨水来洗。对于本身很脆弱的织物和遇水后容易褪色的织物,最好采用水蒸气法来清洗。有些织物的小残块可以在玻璃上进行清洗,因为玻璃表面光滑摩擦系数小,在水的滑动下,可以调整织物的经纬线。在清洗这些弱质织物时,要用极缓的水流使之在织物上慢慢渗过,以免局部受力过大,织物受损。清洗完毕后,将织物放入空气流通、温度适宜的房间进行干燥。而对于某些用水洗不掉的斑点,则应选择适当的其他溶剂来进行清洗。选择溶剂时应先在艺术品的次要地方(如边角处)做小片实验,得到可靠的结果后才能使用,绝不可轻率处置,否则将会使文物受到破坏,造成无法挽回的损失。尤其是在清洗有颜色的纺织品时,必须先做局部点滴实验,以判断水和其他溶剂对颜色的溶解程度。可以在有颜色的部位上滴上一滴所实验的溶剂,浸泡大约 1 分钟后,可用白色吸墨纸或吸湿纸吸拭溶剂,若有颜色转移到吸纸上叫作“流淌”,表明这种溶剂能使织物掉色,应立即改用其他溶剂,或者用 5% 的食盐溶液或 2% ~5% 的醋酸溶液进行颜色固定,然后再做点滴实验,必要时可以增大醋酸浓度,最高可达 20%。经固色后,若无淌流现象时,方可使用此种溶剂。

有些油脂类的污斑、汗斑、果汁、动植物的变质产物等均为酸性,一般不溶于水,可在水中添加一些碱性的去污剂,使酸性污染物发生中和反应而变成溶于水的盐或皂,或碱金属化合物等,而被洗去。一般采用有表面活性作用的合成洗涤剂或湿润剂。实践证明,清洗液的 pH 值从 10 到中性时,清洗效果最好。通常使用弱碱氨水溶液作为缓冲的系统来保障安全。因为这种溶液中的碱,当它尚未产生有害作用之前就已经挥发了,使用比较安全。另外也可添加硼砂作去污剂,当浓度为 0.1% ~1% 时,pH 值为 9.2。这些盐(即四硼酸钠)可增加皂化和清洗能力,对清洗有严重污染的棉织品文物,效果较好。

对于纺织品文物上的铁、铜或其他金属氯化物的污斑,可以采用酸性水溶液来处理使之变为可溶性盐类,同时酸性溶液还可固定酸性染料并中和洗涤过程中多余的碱。在清洗棉织品文物时,通常采用较温和的酸或缓冲盐溶液,以防止损伤纤维。醋酸就是广泛应用的一种,当它的浓度接近 1% 时,pH 值为 2.8,当浓度为 28% 时,pH 为 2.0。它又是挥发性酸,一般在它能够在伤害纤维之前,就已经挥发了。

有些纺织品的污斑含有大量钙、镁、铁等离子,可用六偏磷酸钠水溶液去除。这是一种很有效的中性络合剂,它可与金属离子发生螯合作用生成螯合化合物。

同理，对于纺织品文物上的铜锈也可以选用氨或胺类化合物使之与铜离子形成络合物而去除。

纺织品文物上的血斑、尸体污斑、动物凝胶、食物残渣等蛋白质污斑，用水和洗涤剂洗不掉时，均可利用酶的作用来分解它们，因为在适宜的条件下，酶可促使蛋白质加速水解成氨基酸溶于水而达到去除的目的。一般常用一种木瓜蛋白酶（又叫香瓜酵素）在中性和 30 ~40 ℃的条件下，使之与斑污进行作用。操作时必须使溶液与污斑充分接触，一般要恒温一个半小时左右。酶转化作用的条件虽然比较温和，但对已经经历了历史沧桑的毛织和棉织品文物来说，仍然不可避免的有一些影响。因此操作时要悉心观察，如有异常征兆，应立即终止处理。

当纺织品上沾染了有颜色的斑污的时候，通常可以通过氧化的方法破坏有色基团来减轻或消除这些色斑。我们常用的漂白法就是利用漂白剂的氧化作用来破坏颜色。

常用的漂白剂为氯漂白剂，它适用于由植物性纤维组成的棉织品和麻织品，但不适用于动物性纤维。通常使用的氯漂白剂有漂白精。最佳漂白条件是 pH 值为 10 的微碱性的温水溶液。漂洗完后，应用温和的酸中和至中性。对于蛋白类的动物纤维毛织品或丝织品，常用过氧化物漂白剂漂洗。过氧化氢、过硼酸钠用得较多。这类过氧化物与纤维的表面接触后可分解放出新生态氧原子，漂白过程中，应当避免使用金属容器或盖子，因为金属会起催化作用，加速反应。

对于因氧化作用而产生的斑污，只能利用还原作用去除这些有色污斑。其方法有两类：一类是由于金属锈蚀而产生的污斑，通过还原作用使锈斑变为可溶物，把锈斑的颜色除去或变为不太明显的色调。另一类是由子有机染料或天然颜料造成的污斑，它们很容易因氧化或还原作用而起变化。但还原作用比氧化作用要缓和些，一般不会切断整个发色基团，但可使双键或三键变为单键，这样可使颜色消失。常用连二亚硫酸钠或者用甲醛化次硫酸钠作洗涤织物的还原剂。其操作是：先用连二亚硫酸钠溶液将污斑浸湿，然后在浸湿的斑点上撒上一些连二亚硫酸钠粉末，并在斑点上加一点 5% 醋酸溶液，使化学反应加快。如果织物上有银、铜、铁或其他刺绣和纽扣等物时，则应使用氢氰酸稀溶液清洗，而不能使用次硫酸盐清洗，否则不仅会使其失去金属光泽，而且还可能发展成黑斑。

（2）干洗法

有许多污斑，既不能溶于水，且用水处理也不安全。因此，通常采用无水的有

机溶剂来清洗，叫作干洗法。适用于洗法洗涤的污斑有油、脂蜡、焦油、树脂、黏结剂、虫胶、油漆、涂料、橡胶和塑料等。这些污斑虽然也可以在水中皂化或用洗涤剂来乳化，但使用有机溶剂清洗更有效、更安全。

用作干洗剂的有机溶剂通常有酒精、丙酮、汽油、苯、甲苯等。用有机溶剂洗涤纺织品文物时，应该先做点滴试验，只有确实证明该溶液不使织物褪色，不破坏织物结构，能有效地去除污斑后才能使用。因为这些有机溶剂多是一些低沸点的易燃、易爆物质，应该特别注意防火、防爆。

在有机溶剂中，最常用的是三氯乙烯，这种溶剂易挥发、不易燃。用纯的冷溶剂浸洗纺织品文物时，浸渍时间一般不超过 30 分钟。如果用三氯乙烯浸洗时织物上的颜色有流淌现象，则可改用二氯乙烯。经这类含氯有机溶剂洗涤后的织物，不仅可以除去污斑而且还可以防止虫害。

石油溶剂也是优良的清洗剂，特别适用于除去油脂类、烟炱和染料的斑污。石油溶剂价格便宜，毒性小，不易爆炸，使用较安全，而且对大多数纺织品无害。若有糖、盐和其他水溶性沉积类污斑存在时，可以稍加一些水到溶剂中，使之发生乳化作用后，即可将污斑去除。

有机芳烃类溶剂，如苯、甲苯、二甲苯类可以除去那些由食物、煤烟造成的含有不饱和油类的污斑。有机醇类如甲醇、乙醇溶剂可以去除虫胶和树脂类某些斑污。对于纤维素类的黏合剂，则可用丙酮、乙酸乙酯、乙酸戊酯或其他的酮类和酯类溶剂除去。漆和涂料形成的膜，通常只能用某种溶剂软化后，用小刀或其他工具仔细剔去。

当一些斑污用干洗法和湿洗法均不能奏效时，可适当加入少量表面活性剂，它的作用是减少清洗剂的表面张力或分子间的吸引力，使得溶剂与织物纤维容易接近，即增加湿润作用。同时，由于表面活性剂分子一端为亲水性，一端为亲油性，在溶液中形成许多乳胶束，将污物包围，使污物易于从织物纤维上脱离面进入溶液中被除去。

表面活性剂有离子型（阴离子型和阳离子型）和非离子型两大类。一般来说，非离子型表面活性剂和溶解性较好的阳离子型表面活性剂的清洗效果较好。例如，十二烷基磺酸钠就属于一种常用的阳离子型表面活性剂。

为了有效地除去各类污迹，常常使用混合溶剂。如乙醇∶丙酮∶乙酸乙酯∶三氯乙烯∶海鸥洗涤剂∶醋酸∶水 =9∶1∶6∶2∶10∶2∶7（重量比），上述配比和溶剂种类，可

根据具体的清洗对象，适当加以调整。

2. 鎏金器物表面的清理

目前，对鎏金铜器或银器上的锈蚀处理有两种方法。一种以机械方法为主，利用化学药品来分解软化器物上的绿锈，再用手工工具及一些小型电动机械来除去器物表面的锈层。另一种方法则是以化学方法为主。

（1）机械方法。鎏金文物的锈蚀，往往是较硬的锈层处在薄软的鎏金层上，纯粹的机械方法去锈很有可能使鎏金层损伤和剥落，因此必须辅助以适当的化学方法才能取得好的处理效果。一般使用 EDTA 的络合法。

先用棉花签蘸 EDTA 液滴在锈层表面，使锈层局部处于浸泡状态，片刻后将该部位放置于 5 或 10 倍的双目显微镜下操作，用尼龙刷或玻璃毛刷缓慢刷除，对于较硬些的锈，则视锈层的不同坚硬程度分别使用竹刀或有机玻璃制的刀，直至使用钢制刀进行仔细的剔除。清除掉这一小范围的锈以后再换另一处滴加 EDTA，就是这样采取小区域的局部处理。对于浸在鎏金表层的 EDTA 液，经过一段时间后，无论是否将锈除掉，都应及时将这一局部用蒸馏水清洗干净，依锈层的情况可反复多遍的浸泡和使用工具来剔除锈，当然每次使用 EDTA 后都必须用蒸馏水清洗干净，重复上述的操作步骤和环节直到将锈除净。

如果局部滋生有严重的铜锈已将表面的鎏金层腐蚀掉并产生体积膨胀，这部分采用牙科中使用的电动打磨机，通过更换不同的砂轮将膨胀出原始表面的部分磨掉，直至其表面基本与鎏金层持平为止。①

（2）化学方法。目前有四种化学方法可以用来去除鎏金表面的铜锈。

方法一：乙烯基乙醇/丙烯酸聚合物的稀甲酸溶液。乙烯基乙醇/丙烯酸聚合物是一种强吸水性物质，并具有良好的控水能力。与稀甲酸混合后形成一种新型的糊状物。将新型糊状物放在鎏金器物的绿锈上，糊状物里的稀甲酸溶液就与绿锈表面接触，而且不会向器物的金属本体渗透。这样，很薄的绿锈层就会被去除，依此一层接一层地处理，就可以达到去除绿锈的目的。为了防止锈斑过分地被去除，或将金属器上多孔的、脆弱的锈体部分溶解，可在使用这种糊状物去锈之前，将一种热塑性树脂涂在器物需要保护的部位上。绿锈被去除后，必须用热的蒸馏水

① 赵西晨：《唐代鎏金铜碗的修复保护》，《文物保护与考古科学》1988 年第 1 期，第 44—49 页。

将这种强吸水性的物质及保护性树脂完全清洗干净。①

方法二:以 EDTA 为主,并结合碱性罗歇尔盐为辅。首先将鎏金器物浸泡在蒸馏水中清洗,将最外层部分的泥土用刻字刀或其他工具机械去除。将脱脂卫生棉浸泡在 10% 的 EDTA 溶液中,敷在泥土之上,待其软化后去除,绿锈部分分别用 EDTA 和碱性酒石酸钠去除。而较难溶的 Cu_2O 可以在酸性条件下用硫脲与 EDTA 相结合清除②。

方法三:5% 半胱氨酸溶液。浮土用牙签剔除,较为牢固的土锈可用无水乙醇作为松土剂,再用牙签剔除。浮土清理干净以后,将 5% 半胱氨酸溶液,用氢氧化钠水溶液将其 pH 值调至 8.5 左右,将半胱氨酸溶液水浴加热,温度控制在 50~60℃之间,用纸浆吸取溶液,以镊子撕取小片纸浆敷在所要除锈的部位,敷好后将器物放在一定的容器中,放入 50~60℃的水中。随时用针管吸取半胱氨酸溶液向纸浆中追加溶液,当纸浆变色后,更换纸浆,重复以上操作,直至露出鎏金表面停止。除锈完毕后,用蒸馏水将器物上的残留的除锈剂和溶解的锈蚀产物冲洗干净。避免对鎏金本体和胎体造成损害。③

方法四:对于鎏金银器,为了不使鎏金薄层和银受到损伤或产生不良的变化,可采用甲酸除锈并添加少量的巯基苯基四氮唑。先用少量无水乙醇溶解巯基苯基四氮唑后,再加入稀甲酸配成溶液。在要除去锈垢的银器表面部位,盖上用上述溶液湿润过的脱脂棉花,半小时后,银器表面的绿锈就会逐渐被溶解而出现蓝色的混浊,轻擦锈垢,再用新的浸有该溶液的湿棉球反复几次即可。最后用蒸馏水冲洗。④

二、出土文物的修复与补缺

文物作为人类活动的成果,具有多重价值。首先它反映了特定历史环境、历史

---

① (日)泽田正昭、郭殿勇:《镀金铜器上清除腐蚀产物的新技术》,《文物保护与考古科学》1995 年第 2 期,第 62—63 页。

② 杨小林、潘路:《唐代鎏金铜天王像的保护与研究》,《文物保护与考古科学》2001 年第 1 期,第 21—27 页。

③ 崔亚平:《鎏金青铜配饰表面氧化亚铜锈蚀的清洗方法研究》,中国文物保护技术协会第二届年会论文集。

④ 祝鸿范:《出土鎏金银器的除锈垢处理》。

条件所形成的历史价值。另外，它还可以被看作艺术品，具有美学价值。文物修复工作就是对文物的历史价值、审美价值等进行重新恢复。保持文物的历史真实性是修复的主要宗旨，修复时不能对其物质组成部分进行干预，不能改变特定的历史背景和条件赋予文物的意义，更不能抹杀在历史进程中任何自然与人为因素对文物造成的改变。

文物修复是一项综合性的工作。了解器物的结构特性、制作及病变原因，对于保护修复器物至关重要。它需要历史、考古、自然科学等多学科的相互配合、协调，通过各学科的共同参与，才能安全、准确地修复保护好一件历史遗物。因此在文物修复与补缺之前，了解修复原则、做好修复方案十分重要。[①]

（一）残缺破碎文物修补的几个原则

1. 保持文物的历史真实性和艺术性

根据历史证据和文献资料我们能够进行残缺修补。在进行修补时必须对其艺术风格进行研究，确保修补后能体现该文物的原始风貌，绝不能凭主观想像去臆造或创造。

2. 最小干预

对于文物来说，任何修复行为，都是对它的一种干预。在保证文物结构稳定的基础上，尽可能地不去添加人为的修补，尽可能多地保留原件及原有结构位置。将人为附加部分用在最有必要补全的地方，只要不影响器物力学稳定性，就不要刻意去弥补表面的残缺。

3. 可辨识性

补全部位所采用的材料与工艺，最好是原材料、原工艺，但也不应该是完全的类似，应该是容易识别的，做到“远看一致、近观有别”。一定要既能看出哪些地方是原始的，哪些地方是补全部分，同时也不能因为这种识别而破坏整体艺术品的观赏性和完整性。

4. 可逆性

在我们进行残缺修补时，无论处理方法还是选材，都应该充分考虑到可逆性，即修补部位易于拆除，不影响和损坏文物的原始材料，不影响以后的再次工作。随

① 陆寿麟：《文物的科学研究和文物保护修复的原则》，《文物科技研究》，科学出版社 2004 年版。

着科学技术的发展,我们会得到更好的材料与解决的办法,若干年后,现在所选用的材料与修复方法都会改进,这样的话,可逆性显得尤为重要。另外,可逆性原则还允许我们在修补过程中,可以随时纠正错误的地方。

5. 兼容性

文物修补所使用的材料必须是可逆的、兼容的产品。选用的材料同艺术品的原材料及其病变程度要相适应,原材料与被选材料在物理、化学等性能上必须是相接近的,不能改变和破坏艺术品的原材料。不能对艺术品造成新的破坏。

6. 安全耐久性

文物的残缺修补所选用的材料与方法中,除具有可逆性外,还应不对艺术品造成新的损害,并有利于长期保存。

在实践中面对不同类型的文物采用的修复方法也各有不同,必须根据实际情况,遵守修复原则,因地制宜、有效地进行文物修复。

我们可以从目前具有代表性的陶器修补和青铜器修复过程来理解文物修复的原则与步骤。

(二) 陶质文物的修补过程

陶质文物的修复是修复工作中最常见、最基础的部分。无论修复何种材质的器物,首先要对文物有充分全面的了解,认清其历史背景、结构组成、制作工艺、埋藏环境、病变原因、保存状态等,并在此基础上制订出详细、可行的修复计划。在制订了修复计划后,便可实施具体的修复工作,包括清洗、加固、黏结、补全、最后的封护和维护等步骤,这些都要遵守修复原则,任何不利于文物保护的方法都是不可实施的。[①]

1. 前期研究与修复计划

(1) 结构特性。无论是素面陶、彩陶、彩绘陶或是釉陶,其陶胎都是由黏土制成。黏土是一种无机物,含量中80%为沉积岩,它具有可塑性、缩合性、多色彩、耐火性等特点。陶器的色彩指黏土中含有的成色矿物质,加上烧制温度的影响,会产生通常所见的红、灰、黑、白陶等。

(2) 制作工艺。制陶技术与工艺表面上看与修复无关,其实它可以为我们提

① 贾文熙:《文物养护复制适用技术》,陕西旅游出版社1987年版。

供许多信息，帮助我们了解器物结构，以及病变与破损部位等规律。手制和轮制是制陶工艺中初步成型技术的两种主要方式。手制又分泥条盘筑、捏塑、板制、模具制作等。不同的制作技术会在器物上留下明显或隐含的信息。手制陶器多数不是一次性制成，每部分互相连接处必然产生一定的空隙，易形成破损区。轮制技术是一种较为先进的制陶工艺，它利用离心力制造陶器，工艺过程包括选择泥坯、提升高度、施压成型、磨光处理、切割卸下等。掌握这些规律对我们了解器物的病变及破损状况有很大的帮助。

（3）病变及其原因。陶质文物的病变中可溶性盐分对器物危害最大，常见的可溶性盐有氯化钠、硫酸盐、磷酸盐等。这些可溶性盐极其不稳定，通过与环境中的水接触，利用陶器的多孔性，进入到器物内部，当器物埋藏环境改变，随着水分的蒸发，盐分就会从内部转移到器表，形成结晶，在器物下表面微孔中产生一定的压力，致使器物表面破裂，产生鳞片状脱落，或形成如霜状的沉积，即盐性粉化。这种病变对器物的安全危害最大，清洗时必须彻底清除。

（4）科学分析。利用物理、化学手段对器物组成材料、病变及结垢进行分析，如X光片能了解器物内部的组织结构，通过科学分析可提高修复的科学性与准确性。

（5）修复计划制订。在综合以上各类信息的基础上，便可制订出针对性的修复计划。

2. 修复过程

（1）清洗。清洗是修复过程中的第一步，也是最基础、最关键的步骤。清洗首先是去除器物上的有害物质，使其更加稳定、更加安全地保存下去；其次是去除器物上影响美观的物质。清洗方式及清洗材料的选择，要求针对不同器物和不同病变而有所区别。清洗方法主要有机械法和化学法。在实际工作中，方法选择要经过分析，并选择小面积部位先进行预清洗试验。化学清洗法会对器物造成二次污染，故选择时一定要谨慎，在使用后一定要将器物表面残存的溶液去除干净，保障器物的安全。清洗是一项认真细致的工作，从某种意义上说，它也是考古发掘的继续。

（2）加固。对于陶器这类多孔性材料，加固是十分重要的，加固不仅能防止陶器表面装饰层脱离，对于较为脆弱的器物，通过加固也能使其更加坚固、完整。加固剂的选择是加固工作中最重要的，它必须具备下列特征：可逆性、抗紫外线、抗生

物侵蚀、较好的渗透性,属惰性材料,化学性质稳定。通常选择热塑性加固剂,如聚乙烯醇缩丁醛树脂(0.2% ~10%)酒精溶液、丙烯酸树脂、丙烯酸乳剂、有机硅溶液。对于彩绘陶、釉陶,在清洗前,视具体情况选用2% ~5%的丙烯酸树脂作预加固处理。

(3) 黏接。经过清洗加固后的器物,可选用胶带纸进行预黏接,对器物形状及各部位的相对位置做到心中有数,在选择好黏接剂后,便可实施操作。一般黏接剂分两种,热塑性和热固性。前者因其原料来自植物纤维,属直线型结构的聚合物,能在溶剂挥发后变硬,能溶于有机溶液,是一种可逆性黏接剂,但强度欠佳。后者由黏合剂、固化剂两部分组成,经反应后形成三维结构的聚合物,具有不可逆性,但其强度较好。实际工作中,常选用后者。特别要注意的是黏接前要在被黏接部位涂抹2%的丙烯酸树脂,丙烯酸树脂可溶于丙酮或三氯乙烷中,具有可逆性,我们可利用它的这一特性来转化热固性黏接剂的不可逆性,使得修复更加合理、科学,同时为以后利用更好的材料进行修复提供了一个较为便利的条件。这一点在以往的工作中常被忽视,应引起足够的重视。另外,修复时所选择的黏接剂也要与器物本身的质地相协调,相兼容,若器物质地较疏松、易脆,那么黏接剂强度也不宜太大,否则对器物也是一种破坏。总之,黏接力应同最弱部分的力相同,黏接剂与待黏接材料间的黏合力应比黏合层内部的内聚力小。

(4) 补全。为了给考古学家、历史学家进行科学研究提供更加完整的信息,同时给博物馆观众从美观、完整的角度呈现器物的历史、艺术价值,发挥其社会教育功能,对于残破严重的器物,我们应该采用补全的方法来完成文物的陈列与研究要求。但是,补全必须在客观、全面地了解器物的历史背景、原始形态及保存现状的基础上进行,对于器物形态、表面装饰等都不能凭想象进行增减。

1964年在威尼斯举行的第二届历史古迹建筑师及技师国际会议上通过了《国际古迹保护与修复宪章》。《宪章》指出,保护与修复古迹的目的,旨在把它们既作为历史见证,又作为艺术品予以保护。尤其重要的是,它提出了在修复过程中,缺失部分的修补必须与器物整体保持和谐,但同时须区别于原作,以使修复不歪曲其艺术或历史见证。修复工作必须遵守这一原则。因此,对于补全,我们也应该遵从以下四个原则:

第一,可逆性。补全部位要易于拆除,且又不破坏文物的原始材料。

第二,可辨识性。要尊重文物的原始部分,既要与原始部位有所区别,又要相

互协调。

第三,可兼容性。补全材料应同文物原始材料有兼容性,选用修复材料不能改变或破坏文物的原始材料。

第四,最小干预。将人为附加部分用在最有必要补全的地方,不要刻意弥补残缺。

为了让补全部位的颜色协调一致,补全部位的颜色需要进行处理。一般是根据器物自身颜色,在石膏粉内加入粉状矿物颜料。为了不改变石膏的特性,矿物颜料不能超过石膏量的1/3。彩绘陶、彩陶、釉陶等表面装饰层一般可以利用喷色法、点色法做出与器表装饰层较为相似、较为协调的效果。

(5) 封护。在陶器修复完后,为防止外界污染物再次侵蚀,要在器物表面涂一层保护层。目前,可使用丙烯酸树脂(1.5% ~2%)酒精溶液,均匀地涂抹在器物内外。丙烯酸树脂能通过孔隙进人器体,使得器物更加坚固,同时亦能隔绝空气、水分、光线、可溶盐等有害物质的接触,从而起到保护的作用。

(6) 维护。文物处于展柜或库房时,环境一定要十分稳定,温度不能有太大的起伏。同时要做好定期的检测与维护。

3. 过程记录

在整个修复过程中,资料的记录是十分重要的,它是修复工作的见证。当我们拿到被修复的器物后,第一步就应该对器物进行拍照、绘图,并记录下它的保存现状及病变情况。修复过程中使用的材料、使用原因、材料特性、具体实施方法等都要有一个详细、真实的记录。通过建立一整套较为科学的档案,为今后的工作提供便利,同时使后人能从现在的工作中吸取一些经验教训,更好地保护文物。

(三) 青铜器修复的常用方法

在我国,青铜器修复有着悠久的历史。传统的修复技术主要包括:青铜器整形、去锈、补配、花纹的錾刻、焊接、黏接、做锈。随着科技的发展,相关的文物保护保存的法律法规的不断出台,以及世界文物保护领域相关的保护准则、宪章和公约的发布,传统的修复技术正在逐渐地发展成为现代青铜修复技术。

1. 现状调查与检测分析

在现状描述、测绘之后,分析青铜器组成成分、金相结构、制作工艺,根据腐蚀产物分析及腐蚀机理描述,评价其保存状况。

2．清洗、去锈与除氯处理

青铜器清洗主要是去除其表面的附着物。对于大面积存在的钙质结垢和泥垢，一般采用机械方法配合化学法进行清洗。机械清洗易于控制，清洗后不留残留物，不会导致铜器外观颜色的变化。一般是用手术刀配合酒精棉签清除表面较松散的泥垢，用微形打磨机清除较硬的钙质结垢，根据不同的部位选择不同的磨头。

当青铜文物易碎而锈层坚硬，机械清洗很难控制时，就需要配合化学方法。使用像乙二胺四乙酸二钠盐、氨三乙酸氨水复合液、六偏磷酸钠等络合剂，对铜器或进行局部涂敷或进行溶液浸泡处理，这种方法对于清除钙质结垢效果较好。但是要注意：化学方法在使用后，都必须用水擦洗干净，然后用乙醇、丙酮脱水，红外灯烘干。

去锈一般是指去除在正常环境下还能继续发展，对文物造成影响的锈蚀。它不是指铜器表面的附着物。对于那些影响器物外观的锈蚀，一般采取清洗而不是去锈。通常采用的去锈方法有机械除锈法、化学除锈法、电化学除锈法。无论采用哪种方法，重要的是：去锈要保持文物原貌，不能对文物本体造成损伤。

如果铜器锈蚀中含有氯离子，一般认为是感染了有害锈。由于锈体呈现粉末状，故称之为“粉状锈”。对这种器物，一定要去除器物本体及锈体中的氯离子。进行除氯操作，要求除氯一定要完全，确保使用的方法和试剂不会对青铜器本体造成化学腐蚀、机械损伤，不留存对文物有影响的化学成分。目前方法有倍半碳酸钠法、氧化除氯法等。

（1）倍半碳酸钠溶液是一种弱碱性的缓冲溶液。其中的碳酸根可使铜器中氯化物逐渐置换为稳定的碱式碳酸铜，使氯离子从青铜器转移入溶液中，以此法达到清除氯离子目的。具体做法是：把锈蚀的青铜器浸泡在1%或5%的倍半碳酸钠溶液中，浸泡时需要交替加热，使液温白天保持40℃左右，晚上自行冷却。开始时每周换一次溶液，几周后可半个月或更长一点时间更换，浸泡时间至少要三个月。浸泡时如果使用超声波，效果会更好些。这种方法对保存绿色的铜锈有利，也适合需要保留铭文、花纹、古斑的青铜器。值得注意的是：这种方法比较费时，容易在铜器的表面形成孔雀石腐蚀层，色彩鲜艳，导致器物外貌色泽的改变。

（2）氧化除氯法针对的是局部含有氯离子的器物，也就是“粉状锈”明显的器物。它的方法原理就是利用双氧水的高氧化能力，将铜器锈层中的氯离子氧化成氯气释放出来。在处理中利用针管滴加与纸浆糊敷相结合，可以安全快速地去除

氯离子。具体方法是先调配好1%浓度的双氧水，制作好干纸浆备用。用电热吹风机对需要处理的部位进行简单的预加热，这是为了在处理过程中保证双氧水的渗透速度和深度，增加氯气的溢出速度。用针管小心滴加已经被加热的部位，观察氯气的溢出，待气泡减弱，用棉签吸干反应液，再进行第二次滴加，以此类推，直到滴加双氧水后气体溢出很少时停止。为了确保除氯彻底，在夜晚非工作时间，用镊子按锈点部位的面积，镊取浸泡过上述双氧水的纸浆，糊敷到锈层上表面，不用加热，表面也可以覆盖一层塑料薄膜延缓液体干燥时间，这样相当于浸泡法。这种方法的优点是时间短、针对性强、不会影响非含氯部位的原貌。

3. 青铜器文物的修复

不同的修复理念，对器物的修复方案就不同。我国传统的修复思想是使器物完整化、美观化，在这个指导思想下，铜器修复用得最多的技术就是整形、补配、焊接与黏接。

(1) 整形。埋藏于地下的青铜器由于墓穴崩塌、地层变化等原因造成挤压变形，出土后往往需要整形。方法有锤打法、模压法、锯解法、加热整形及其他办法等。选择方法的依据是器物的变形程度和铜器的质地。

(2) 补配。补配是传统青铜器修复技术中复原残缺部分的重要技术。根据铜器种类、形状、残缺部位，补配方法可分为打制补配和铸造补配。近代修复中还有玻璃钢补配等方法。

(3) 焊接与黏接。焊接是传统修复技术中的重要环节，是修复破碎青铜器和复原器形的主要手段。需要根据青铜性质、残破和腐蚀情况不同，采用不同的焊接方法，即“大焊”和“小焊”。

“大焊”也就是铜焊或银焊，这种焊接比较结实。修复古代青铜器一般多用“小焊”，也称锡焊或“鼠接”，是比较原始的焊接方法。焊接所用的“焊锡”是锡和铅的合金，锡占62%，铅占38%，称作“点锡”。

锉焊口是把要对接的铜器碎块的断口上锉出新的铜质，即所谓“新碴”，为了尽可能地保留铜器断口的原来曲线，作为焊接时掌握铜器器形的依据，因此通常是在铜器断口内外方向上偏重一方锉成一定的坡度，使断口接面形成一定的倾角，对接起来即可形成焊口。锉焊口的原则是避免铜器铭文和花纹或其他遗迹遭受破坏，对实在无法避开接口的铭文等，要采用黏接的方法。

黏接办法：历史上有用白芨、漆片、虫胶黏接器物的方法。

其他连接办法：传统修复中，对于那些特别残破的铜器，或器物表面有纹饰不允许大面积焊接的，即可采用焊接、黏接与机械加固相结合的方法，如秦陵铜车马的修复就采用了套接、扒钉、加入螺钉、铆钉等加强件连接的方法。

根据现代文物修复理念，要求修复所采取的技术措施不能对文物造成二次损伤，不能妨碍对文物再次进行保护修复处理。在这种要求下，整形就对器物存有二次损伤的危险，不符合要求，而应该引用更加科学的办法来实现器物原型的再现，比如借鉴计算机模拟技术设计出将恢复的器物原型，然后用同样材料制作一件复制品，供我们研究和陈列。补配的方式与现代的理念比较接近，没有很大的冲突。不过它们在补配程度的要求上有所差异，传统的补配要让观众找不出痕迹，而现代修复要求符合可辨识原则，要求有所差别。

焊接与黏接方面，传统的焊接对器物的断面有一定的破坏，而且引入了新的材料——焊料，在最小干预、可逆性要求方面也有欠缺。现代修复技术在传统的基础上，引进了可逆性涂层概念，保证了可再次进行修复的要求。

在拼接成型方面，现代修复技术采用非永久性连接方式。根据出土器物残片材质分析、对比相同时代同类型器物造型，用相似工艺和相同的材质制造出一件完整的器物——展示用的“支架”。不过在“支架”制作中，把实物残片所在部位预先留出，待“支架”表面的锈色做得与原器物颜色接近以后，将残片镶嵌在“支架”上。这样，即达到了恢复艺术造型的要求，又可以随时卸下残片进行再次研究与修复处理。

4. 青铜器文物的缓蚀处理①

青铜器的表面不耐腐蚀。在现代工业污染的大气环境下，酸性气体、氧化性气体会进一步腐蚀青铜器，尤其在潮湿、含有氯离子的酸性气体条件下，还会有粉状锈生长的危害。所以青铜器文物一定要做缓蚀处理。作为器物表面缓蚀层要求结构致密，与铜本体结合紧密，能够有效去除氯离子。同时不改变文物外观，缓蚀效果长期有效。目前，常用的一种方法是 BTA（苯并三氮唑）法。

1967 年 Madson 首次将 BTA 法用于青铜器的保护，效果良好，至今成为最受欢迎的方法之一。BTA 抑制铜腐蚀的原理是成膜机理，它与 Cu_2O 膜存在有关，可能

① 宋迪生等：《文物与化学》，四川教育出版社 1991 年版。

形成 Cu(I) - BTA 配合物保护膜和 Cu(II) - BTA 配合物保护膜。这种保护膜不溶于水，贴在金属外部把金属与腐蚀介质隔离，从而使金属的溶解力或离子化程度大大降低，达到保护金属的作用。有些学者还认为 BTA 吸附于铜器表面，可改变金属与溶液的界面结构，使阳极反应活化能显著升高，从而降低铜器本身的反应能力。国外许多学者如 Poling，Roberts，Walker 等人通过试验证明 BTA 处理后受蚀面上形成的一层 Cu - BTA 络合物与 BTA 浓度、温度、浸渍时间和溶液的 pH 值等有关。

BTA 的操作工序是先配制 5% 的 BTA 乙醇溶液，将之放入可抽真空的容器中，再将腐蚀的青铜器放入容器内，用真空泵抽至溶液呈沸腾状为止，再将整个容器放入恒温槽中恒温至 60℃。放置 8 个小时以上，在恒温期间控制真空度为 400 毫米汞柱（1 毫米汞柱 $=1.333\,22\times10^2$ 帕）。恒温处理后将青铜器取出，用乙醇洗去表面残留的 BTA 结晶。BTA 在 60℃ 以下作减压渗透处理，使缓蚀剂充分渗入锈层，这样做成膜也最好。如无减压设备，也可用 3% BTA 溶液浸泡或用毛刷蘸取 BTA 溶液直接在青铜器上反复涂刷。

目前，比较多用复合型缓蚀剂，推出了许多 BTA 的衍生物，如甲基苯丙三唑（TTA）、2，5 - 二巯基噻二唑、2 - (5 - 戊基胺 -) 苯丙咪唑等。这些新衍生物在抑制铜的腐蚀方面均优于 BTA。

第三节　文物的保存

田野考古发掘出土的文物，经过了地层方位测绘、照相记录、提取采集、清理修复等环节，为了今后的研究与陈列，它们将转入一个固定的空间进行保存与陈列。在从田野出土到最后的博物馆保存与陈列，文物经历了不同类型的保存环境。在考古发掘现场，是一个临时的库房环境；在考古研究部门的库房以及博物馆的文物库房，则是一个长期稳定的库房环境；在博物馆的陈列大厅，又是一种必须接受灯光照明、观众参观的陈列环境。由于不同场景，其保存环境的控制手段不同，文物保存与保护的要求也就不同了。而对于那些脆弱的文物，由于本身性质的不稳定，也有着一些特殊的保护要求。所以，文物在保存环节中需要做的工作仍很重要，也很艰巨。

一、文物保存环境的调节与控制

在考古工地，文物在经过科学的采集与清理之后，需要有一个临时的存放空间。这个空间的主要任务是确保文物的安全。但是，由于文物处在出土的初期，其自身性能与环境各种因素的相互适应过程还在继续。因此，文物在工地库房保存的同时，仍需要进行一些简单保护处理，更重要的是需要进行环境控制。把保存环境的影响降到最小，可以为日后的保护处理赢得时间，同时也为日后的处理降低了工作难度和工作量。

（一）考古工地临时库房的环境控制

对于出土的不同种类文物，考古工地的临时库房很难做到分类进行环境控制。通常是根据库房实际条件和考古发掘季节进行总体环境控制。对于特别脆弱的文物种类，可以在总环境条件下，分别对其进行小环境控制。在实践中，具体的方案应该根据考古工地的具体情况，因地制宜，既要符合保护的环境指标，又要考虑工地实际条件的限制。

考古工地库房建筑通常是临时的活动房屋建筑，也有临时借用的普通民房。在保证正常考古工作进行的前提下，临时库房的选择应该是背光向北、中间楼层、门窗小而少、没有上下水管道。

临时库房的窗户最好是朝向北方。背光是为了在文物存放期间，没有阳光紫外线和远红外线的直接影响。选择朝东或朝西都是不利于文物保存的。日出和日落时，阳光可以直接照人东、西窗户，因而，紫外线和太阳光热辐射都会严重损害文物。在库房内，人工光源照明可以选择紫外线含量很低的普通白炽灯，既经济实惠又紫外线含量少。如果采用紫外线吸收剂涂膜材料对日光灯进行处理，也可以使用，既保证了照明亮度、省电，又不含紫外线。

库房的层位选择也很重要，它决定了临时库房受地下水毛细作用和楼顶渗漏影响的大小。临时库房最好不要选择在房屋的一层，也不要选择在顶层。一层容易受地下水毛细作用影响，顶层容易受屋顶质量好坏的影响，质量不好的经常会出现房顶雨水渗漏。如果房屋建筑只有两层，就要根据楼房质量和工地所属地区的雨水多少来选择一层还是顶层。对于质量比较好，顶层楼板不漏水的房子，或者工地处于干旱少雨地区或干旱季节，选择顶层比较安全。对于房屋质量不好，楼板薄

而易开裂渗水，则最好选择在一层。如果库房只能是一层楼，则需要对库房房顶事先进行防渗漏的维护，对地面进行防水处理。在多雨季节，无论在哪一层楼，都要紧闭门窗，将文物放在离地面有一定距离的文物架上，有条件的还可以在地面铺设一层吸水性好的材料，如麻袋、木屑等，保证文物处在正常的干湿度环境中。

对于临时库房的门窗，如果原来的房间窗户是为了居住而设计的大面积窗户，必须对它进行简单的改装。一般可以用泡沫塑料材料，或者木工板、石棉板将窗户进行活动式临时封闭。即按照窗户的实际大小裁剪好同样面积的材料，将原来窗户关闭后，把用来封闭的材料覆盖到窗户内侧，用木条封钉。这样，既可以避免由于窗户带来的阳光、灰尘、有害性气体等不稳定因素的干扰，又可以防止外界环境温湿度变化带来的影响。在日后不将此作为库房的时候，也能方便地卸掉封闭材料。

在临时库房内部，最好不要有上下水管道，包括取暖用的暖气管道。这样可以避免管道漏水、暖气管道爆裂等突发事件带来的水的影响，也可以减少因为环境温度变化带来的冷凝水的干扰。

在选择好临时库房的楼层位置并做好门窗处理之后，随着考古发掘的进展，文物将不断地被发现并送入该库房进行保存。这时在保证该库房的安全的基础上，要制定该库房环境指标参数，做好环境调节控制工作。①

1．临时库房总体环境控制与调节的标准

在考古工地的文物库房，要存放的文物种类可能会很多，随时也会有未知种类文物出现。通常要根据大多数种类文物的普遍需要，制定一个总体的环境控制标准。对于那些少数特别的文物，可采用小环境控制有针对性地予以保存。

对文物有影响的环境因素一般有：温湿度、光照度、大气环境和生物因素。在考古工地，文物库房温、湿度的控制是十分关键的。因为文物出土后，首先面临的是其含水率的变化以及文物组成各部分在温度剧变下的膨胀与收缩。其次，文物库房需要面对的是生物因素的影响。出土文物在清理之前，其表面附着物往往带有很多霉菌孢子与虫卵。在环境条件合适的情况下，霉菌与虫害会很快发生、蔓延。在文物临时库房的周围，最好不要有厕所和动物圈栏，更不能有化工厂，避免

① 穆德润：《浅谈环境与文物》，《科技考古论丛》（第1辑），中国科学技术大学出版社1990年版。

给文物带来有害性气体的影响。

根据研究总结，各类文物的存放环境指标如表 8.1：

表 8.1　文物存放环境的基本要求一览表

文物分类	文物种类	温度（℃）	相对湿度（%）	光照度（lx）	大气环境	生物因素
无机质文物	石质文物 陶、瓷器	14～24	40～55	300	无酸性气体、防尘	
	青铜器	14～24	30～45	150	防尘、无氯、 无酸性气体	
	铁质文物	14～24	30～45	150	无酸性气体、防尘	
	金银器	14～24	40～55	150	防尘、无硫化物、 无酸性气体	
有机质文物	纺织品	14～20	50～60	50 防紫外线	防尘、空气清洁	防虫、防霉
	纸质文物	14～20	50～55	50 防紫外线	防尘、 空气清洁	防虫、防霉
	骨、象牙	14～20	50～55	50 防紫外线	防尘、空气清洁	防虫、防霉
	木质文物	14～20	50～60	50 防紫外线	防尘、空气清洁	防虫、防霉
	皮革制品	14～20	50～60	50 防紫外线	防尘、空气清洁	防虫、防霉

从表 8.1 中可以看出[①]，文物存放环境分两大类，即无机质类文物和有机质类

① 郭宏：《文物保存环境概论》，科学出版社 2001 年版。

文物。

无机质文物的存放环境总体为：温度 14 ~ 24℃，相对湿度 30% ~ 55%，光照度 150 ~ 300 勒；大气环境要求清洁，无灰尘、无酸性气体。

有机质类文物的存放环境总体为：温度 14 ~ 20℃，相对湿度 50% ~ 60%，光照度 50 勒，无紫外线；大气环境要求清洁，无有害性气体，防尘、防虫、防霉。

由于无机质文物与有机质文物的存放环境要求不同，在考古工地条件许可的前提下，文物临时库房应该是两间房屋以上，将无机质文物和有机质文物分开放置，同时分别进行不同指标的调节与控制。

如果条件不许可，只能有一间文物库房，就要根据当地主要环境特征来确定临时库房的执行指标。如果当地主要环境适合有机质类文物保存，就将有机质类文物保存环境作为临时库房的主要环境。把无机质文物放入文物柜或文物箱内，进行小环境控制，反之亦然。如果出土的大宗文物是归属某一类文物，就根据该类文物的需要制定临时库房主体环境标准。

2. 特殊环境下库房环境的调节与控制

在寒冷地区或寒冷季节，库房的温度有时会很低。对于大多数文物，一般的低温影响不大。当室温低于 -4℃，对于含水率很高的出土文物，就要考虑液态水结冰带来的内应力破坏。通常的做法是对文物库房环境进行一定的加热升温。在加热工作中，切忌不能带进明火或采用高功率电加热器，以免带来火灾、有害性气体。最好采用小功率、远红外加热器，这样比较安全。同时，加热升温不能太高，控制在 0℃就行了。在加热中，工作人员不能离开库房，以确保整个过程在安全状态下进行。

在湿热地区或炎热季节，库房的温度也会相应很高，通常属于高温、高湿环境。[①] 这种环境对于文物保存非常不利，既会加速文物病变的速度，又利于霉菌虫害滋生。当温度高于 30℃，湿度高于 70% 以上时，文物的安全就很难保证了。在这种库房环境下，环境的调节显得非常重要。通常的做法是在文物库房中采取降温降湿的措施。对于有条件的临时库房，安装空调是十分方便、直接的办法。对于没有条件的临时库房，可以购买工业冰块，套上聚乙烯塑料袋，放置在房间空地上，

① 肖璘：《略论环境与文物保护》，《科技考古论丛》（第 2 辑），中国科学技术大学出版社 2000 年版。

下面放置盛水容器收集空气中凝结的冷凝水，这样可以降温、降湿。对于条件艰苦的地区，只能将高温、高湿中的一项降低，达到减少环境对文物影响的目的，通常可以做到的是将湿度降低到60%以下，以减少霉菌生长的机会。也可以在库房内悬挂吸水性材料，用电风扇加速气流流动来达到降湿的目的。

在干燥地区，大气环境的湿度经常低于20%。干燥对于无机质类文物，尤其是金属类文物，是有利于保存的。但是，对于有机质类文物，特别是那些在地下埋藏时含水率较高的文物，出土后就会遇到失水速度太快，导致文物干裂、酥粉的问题。对于这一点，临时库房需要对这一类文物进行保湿环境控制。有一种办法是在大库房里划分出一个小空间，尽量做到密封，在小空间里放置一些加湿的设备和材料，如加湿器、盛水容器，使环境湿度尽量与地下埋藏环境接近。地下环境潮湿的地区，库房的小环境湿度应该保持在90%左右，让文物在这个空间里慢慢失水，最终与大气环境慢慢适应。

（二）文物库房的环境调节与控制

由考古工地转入研究部门库房，或转入博物馆的保管库房，文物进入了一个安全、稳定的空间。与此同时，文物库房环境的各项指标能否达到保存文物的需求，并且一直保持稳定，就显得十分关键。而想要做到这一点，就必须有一个符合文物保存环境要求的库房建筑。

文物库房建筑是一种特殊的建筑形式，它的设计与建设必须符合文物保存环境的要求。既要考虑到外界环境的影响，又要考虑到各类文物存放环境的不同要求。

在现代化城市中，文物库房受外界大气环境的影响很大。这一点主要是指大气中有害气体对文物的危害。随着现代工业的发展，大气中氮氧化物、硫氧化物、二氧化碳、氯化氢、氯气等有害气体的含量越来越多，有害气体对文物的影响也越来越明显。对于这一点，博物馆或文物研究单位在建设库房选址的时候要重点考虑。通常的做法是：根据城市建设规划选择周边将来不会有大型污染工业的地区；根据环境监测数据证明目前该地区没有大气污染情况；考虑到库房内将来的环境控制问题，库房选址不要在地下水位高或地势低洼地区，更不要靠近江河湖海。从防火的角度来看，库房选址也不应该在繁华的闹市，并且与其他建筑保持一定的距离。

如果文物库房地址是不能改变的,则一定要搞好周围绿化工作。因为大部分植物对大气污染物有吸收作用,所以绿化对净化空气有很大的作用。所以为改善文物库房环境,要建设一个绿化自净系统,使文物库房外环境达到标准,为库房内环境控制创造条件。

文物库房建筑自身的要求也很高,通常要求做到"九防",即防潮、防高温、防光、防虫、防尘、防有害性气体、防盗、防火、防震。要做到"九防",需要对库房建筑的每一个部分、每一件构件认真设计与建设。库房房顶采用人字形通风间层隔热屋顶,并做防水处理;库房建筑墙体外墙抹1~1.5厘米的防水砂浆;墙体使用隔热材料填充隔热保温;库房窗户在尽量少而小的前提下,采用双层密封性很好的塑钢玻璃窗,表面涂紫外线吸收剂,同时采用各种形式的遮阳板,挡住阳光对库房内的影响;库房进出的门采用过渡间隔离或设双道密闭门;库房的地面应该架空,架空层净高不小于0.45米,库房地面用密实的100号以上的细石混凝土实铺地面,用1:2泥砂浆抹面;另外,库房每一件构件不但要考虑是否符合防火的要求,而且还要考察是否会散发出有害性气体。保管库房的文物柜架有木材和金属两种质地。两种材料各有优缺点,在使用时要避免因柜架材料的原因造成对文物的损坏。对于这一点,文物保护技术要求每一种库房构件材料都要有实验数据证明其老化过程中没有释放出有害性气体才能使用。

在有条件的文物库房内安装空气净化装置,对有害气体和灰尘进行净化与过滤,一般都能收到较理想的效果。也可以在通风口采取简单的净化与过滤的措施。例如,按通风口的面积大小做一个匣体,倘若是过滤灰尘,要将不同孔径网眼的波纹金属网多层交错叠置在匣体内,沿空气流动的方向,孔径逐渐缩小,使用前金属网要浸油(10~20号机油),使用后清洗可用浓度为10%的60~70℃的碱水,洗净后晾干浸油,再继续使用。如果是净化空气中的有害气体,可在匣体内填充活性炭。1克(约2立方厘米)活性炭的有效接触面积为1 260平方米,正常条件下它所吸收的物质等于自身重量的15%~20%,当达到这种程度时,就需要更换新的活性炭了。

库房环境的日常观察、调节维护是容易做到的,同时也是容易忽略的。一个设计合理的库房应该在进入库房前要有一间缓冲间,人员进入库房后马上关闭外密封门,在缓冲间内更换拖鞋、衣服,然后进入库房。对于有条件的文物库房,开启空气净化与温湿度自动调节系统,可以减少很多工作量,但是也要经常核对环境的实

际测量数据与调节系统的控制指标是否一致。绝不能上班时开机调节控制，下班时停机，这样做不到恒温恒湿，更加不利于文物保存。对于没有安装调节系统的库房，在每个库房小环境中要放置自记式温湿度仪，一周检查一次库房的环境温湿度变化曲线，这样可以及时发现问题，进行必要的调节与控制。

在保管库房存放着各种材质的文物，各种材质对环境因素要求不同。不同质地的文物必须按照种类区分，放置在各自的保存环境中，用不同的空调设备各自调节存放环境的温湿度，温湿度的波动范围应限制在允许的范围，短时间内不能有大幅度起伏。不能将环境要求不同的文物放在一个库房空间之内。如果库房面积太小，必须放在一起，也需要制作大环境中的若干个小环境来放置那些数量少的文物种类。

通过对文物环境的调节与控制，使构成文物的材质处于相对平衡的状态，把环境对文物的影响降到最低限度，为我们日后研究文物、保护文物赢得时间。

（三）文物陈列中的环境控制

在文物陈列中，我们关注的中心往往是文物的陈列主题、艺术效果，容易忽略文物保存环境的要求。在陈列条件下，光源选择、陈列柜的密封要求、温湿度的稳定性处理，都需要我们认真分析、严格控制。

展厅的环境是一个半开放式的空间，它与外界的环境间接相通。大气环境中的有害气体、灰尘等有害因素，可以间接进入展厅，使得展厅环境十分复杂。文物离开库房，进入展厅，甚至有一些文物直接与展厅的环境相接触，在库房中可以做到的环境控制，在陈列条件下很难实现。如果给陈列大厅入口设计一个缓冲空间，使外界空气不能直接进入展厅，同时，让观众套上一次性鞋套，通过风浴除尘，便可以大大减少外界环境对展厅环境的影响。

文物陈列常常要求在灯光上对重要文物给予突出渲染，但这样对文物不利。对于纸质文物、纺织品、竹木漆器等有机文物，可以安装过滤紫外线的冷光源。同时，设置人体感应电路，只在观众靠近时照亮，避免灯光对文物造成伤害。

与库房环境不同，展厅环境是在不断变化之中的，如观众带来的污染物的瞬间增加与滞留，呼吸产生的 CO_2 的浓度升高，人流带来的空气扰动等，尤其在重点展示前人群的滞留会造成局部环境的恶化。因此，对展厅的监测是一种动态的监测过程，除了得出所监测数据的数值外，还应分析数值波动的空间变化趋向，分析人

流对环境造成的影响，从而得出治理的依据与改善方法。

展柜是文物在展厅中所处的一个相对独立的微环境。在理想状态下，展柜中的空气不与展厅发生交流，可以避免展厅空气中污染物质与水汽的进入。但是实际上，大多数展柜都做不到密闭，展柜中的环境与展厅环境存在着扩散交换的过程。这样，展柜中的环境就可能出现一定的波动。

即使在展柜密闭的情况下，展柜环境仍然会受到展厅温度、灯光辐射的影响。展厅的温度和灯光辐射会使展柜内温度上升。有些展柜的照明光源在展柜内部的上方，在密闭的展柜内自身的热辐射导致的热量无法散发，也会导致展柜内部的温度明显上升。这就要求文物陈列光源尽量使用冷光源或光纤照明。

对一些脆弱文物，其陈列展柜的微环境要求比较高。要尽量避免展厅环境的干扰，最好进行独立的展柜环境控制，如展柜内的温湿度控制系统、充氮、独立照明控制等。

二、常见文物的保存[①]

（一）几种普通文物的保存

对于那些自身抵抗环境变化能力比较强的文物，我们称之为普通文物。这类文物多为无机质文物，例如玉石器、金银器、陶瓷器、没有矿化的青铜器等。它们对保存与保护的要求不高，主要是经常检查、安全陈放、控制环境。

1. 玉石器的保存

玉石器在考古发掘之后，表面的附着物虽然已经清洗，断裂与酥粉也得到黏结与加固，但是，在之后的一段时期内还是可能出现病变的延伸，需要定期的观察与维护。

首先，观察有无结晶盐与酥粉现象的再次出现。这一点是判断出土后的清洗是否完全，体内的可溶性盐类是否还随着潮湿、干燥的变化而活动。如果是，我们需要对保存空间进行严格控制，控制温湿度的变化幅度。同时，对器物需要重新进行除盐处理、进行表面加固与封护处理。

其次，观察有无新的裂隙的发育，修复过的断裂缝是否发展。这一点是对石材

① 张承志：《文物保藏学原理》，北京科学技术出版社1999年版。

本质的观察,也是对环境潮湿的检查,因为在温度起伏变化中,石质表面作为冷表面,容易吸附冷凝水。除了结晶盐的作用外,石质中的水遇低温结成冰,体积增大,在长期霜冻周期作用下亦可使石质破裂(通常称冰劈作用)。石头中的细晶粒一旦分解产生裂缝,便给微生物提供了繁殖场所。因此,质地疏松的石质文物,特别是砂岩器物,一定要做好表面憎水处理,严格控制环境温湿度。

最后,定期测试石质文物保存环境监测,如环境中的酸性气体含量、灰尘的数量、微生物的存在与否。酸性气体会带来石质文物风化侵蚀,增加石质文物的可溶性盐类;灰尘的积累为微生物的生长带来机会;在一定温度条件下,石质文物具有适合真菌生存的条件,使得微生物滋长,这些微生物会分泌出一种生物酸,甚至有些细菌分泌出的酸还具有氧化能力,这种复杂的生物化学作用能引起石质表面大范围的碎裂和腐蚀。

2. 金器的保存

金的化学稳定性高,不易被氧化,也不易被溶化,仅与卤素和王水反应,因而纯金的金器一般无需保护,只是在保存和陈列中注意文物不要被挤压、碰撞。金器的保护通常指的是金的合金,如在金中掺银、铜、铁等,鎏金的金器腐蚀则主要来自胎基的金属。不同的合金,保护措施不同。掺铜的金器易出现绿色的薄锈,可用酸类或氨水除锈。掺铁的金器易出现红锈,可用盐酸去锈。

3. 银器的保护

银的化学稳定性较好,但比金差些。银虽不易被氧化,但遇硫化氢、臭氧却易腐蚀。所以,银在空气中放久了表面变暗发黑。埋藏于地下的银器长期受土壤中盐分、氯化物的侵蚀,会在表面形成氯化银,严重时渗入内部。氯化银是一种微带褐色或紫色的灰色物质,很软可以用刀切开,在腐蚀过程中会体积膨胀,导致器物变形。氯化银薄薄一层时,会使器物表面染上各种颜色,即器物形成古斑,它很稳定。

银器的保护重在维持原貌。因而轻微腐蚀的银器表面的古斑或黑色(少许),一般不用处理。有时为了改善外观,也可稍加处理,用氨水酒精溶液擦洗。

银器的保存环境十分重要。在文物库房,可用柔软的薄纸包好,外层再用一种浸有铜化合物、叶绿素等化学试剂的软纸包装(用来吸收空气中的硫化氢)。将包好的银器存放在密封的聚乙烯袋子里,控制相对湿度在55%以下,并防止紫外线的辐射。在陈列中,要杜绝含硫物质的渗入,还要防尘、防紫外线,保持干净。

(二) 几种脆弱文物的保存

对于那些自身抵抗环境变化能力比较差的文物,我们称之为脆弱文物。这类文物多为有机质文物,如竹木漆器、纺织品、纸张、皮革等。有些无机制文物也是比较脆弱的,如锈蚀的铁器、铅质文物等。

对于脆弱文物的保存,环境控制十分重要,它们保证了这些文物保护处理的效果,也决定了文物的寿命。

1. 漆木竹器的保存

在文物库房的竹木漆器,经过脱水定型处理后,慢慢与它周围环境处于平衡状态。在保存过程中,如果环境过于干燥,它们还会继续翘曲、开裂,而过于潮湿也会出现病变。一般应将湿度控制在45% ~55%之间,最佳相对湿度是50%,温度为15 ~20℃。

保存过程中,竹木漆器消毒、杀虫方法很多。竹木漆器消毒可以使用环氧乙烷、二硫化碳进行熏蒸消毒。二硫化碳杀虫效力高,常温下为无色透明液体,有臭味,易挥发,易燃易爆,使用时不能接近火源,最好在专门的熏蒸室内或在密闭的箱柜中进行,用胶纸或聚乙烯带将柜四周贴紧密封。熏蒸二周到三周后,置于通风处晾晒,臭味即可消失。二硫化碳蒸气对油彩清漆不起作用,对于饰有易褪色的彩色的木制品,可用二硫化碳与 CCl_4 的1:4混合溶液来熏蒸。

对于漆木竹器,杀虫可用溶液毒杀和蜡糊填补法。溶液毒杀,通常用滴管或注射器,把五氯苯酚及其钠盐、氯萘、萘的金属化合物或DDT等液体杀虫剂注入器物的虫孔里。但使用前应先试验,以确保所用试剂对油漆、彩绘没有损伤。而蜡糊法是将蜂蜡拌以固体杀虫剂,调成与器物相同的颜色,凝固成糊状后填塞。不但使害虫毒杀致死,又填补了器物表面的孔洞。

对于竹简文物,除了防虫、防霉以外,其保存主要是防碰撞、防老化。可在竹简的背面垫几层薄绵纸以增加弹性,再用边缘光滑的玻璃片绑夹好,以避免竹简与外界直接碰撞而损坏。将夹好的竹简装入玻璃管内,两头垫数层绵纸,抽真空或充惰性气体密封保存。这样可以防霉、防虫,延缓老化。装好的玻璃管避光保存,长期展出的可在管壁上使用紫外线吸收剂涂层。

对于漆器的保存,因其质地娇脆,易遭受损坏,保存时一定要注意避免日光直射及含有紫外线灯光的照射,保持适合的温湿度和避免外力损伤。常采用“滋润

漆皮，包装收藏"的办法来保养漆器。操作时，先将漆器清洗洁净后，遍擦一次高级地板蜡，要薄而匀，用柔软的绒布蘸蜡轻轻涂，再用同样的干布擦抹，使漆皮表面附着薄薄一层蜡膜。这样既可滋润漆皮，又可杜绝潮湿空气的侵袭，增加漆皮光泽。涂蜡后的漆器存放时应进行包装。小件用油纸层层包裹，外衬棉花装入匣内。大件可用蜡纸包缠，套上布面绸里棉套，外包厚蜡纸，用棉布带缠扎，再衬棉花置于木箱中存放。

2. 纺织品文物的保存

纺织品文物主要成分是纤维素和蛋白质，它们都是微生物和害虫的丰富养料。防止纺织品文物生虫、长霉的最有效方法就是纺织品入库前消毒处理，入库后控制好库房环境。合适的温湿度和洁净的空气是保存纺织品文物的最佳环境。对于腐朽的纺织品，需要一定的加固处理。

(1) 纺织品保存前的消毒处理。对于入库前的纺织品文物，一定要做消毒处理，以防将微生物带进文物库房。通常只有用有机溶剂或其他溶剂清洗后的织物，方可免去消毒手续。常用的消毒方法有：熏蒸消毒杀菌、喷雾消毒灭菌。

熏蒸消毒杀菌：常用麝香草酚（化学名称为：5－甲基－2－异丙基苯酚）熏蒸消毒。先将需要消毒、灭菌的织物放在一个严密、不透气的灭菌箱内，在箱中放入麝香草酚晶体，用电灯泡照射加热，使麝香草酚加速挥发成蒸汽，以进行消毒和灭菌。

环氧乙烷（CH_2-CH_2）亦是常用的熏蒸剂，它灭菌谱广，穿透性强，沸点低，挥发快，效果可靠，对纺织品文物的强度、颜色均无损害。它对各种微生物杀灭作用都很强，即使是抵抗力极强的芽孢也能杀灭，且使细菌再无复活的能力。

熏蒸法消毒灭菌时的温度、相对湿度、药剂浓度、真空度、熏蒸时间都能影响杀灭效果。环氧乙烷灭菌的最佳温度为54.4℃，最佳相对湿度为25%～50%。在5～54℃范围内，温度每增高10℃，灭菌效果将提高2.7倍。故提高温度，可大大缩短消毒、灭菌时间。但温度、湿度变化过大对纺织品文物都有损害，一般应在室温和正常湿度的条件下进行消毒，最好使用环氧乙烷和二氧化碳的混合气体（1:9体积比）。这不仅大大减少以至杜绝熏蒸过程中的火灾隐患，而且还增强了环氧乙烷的穿透能力，提高了消毒、灭菌效果，同时又降低了有害残留气体的浓度。也可以将织物放在聚乙烯薄膜的口袋里，从开口一端将纺织品文物放进去后，封口，从另一端开一小口，尽可能地抽空袋子内的空气（因聚乙烯袋子不耐压，抽空只能

适可而止），然后向袋子里通入环氧乙烷和二氧化碳混合气体，用橡皮筋扎紧袋口，2～3小时后，将口袋打开，放出袋中气体，消毒、灭菌即告完毕。由于环氧乙烷穿透力强，即使躲在纺织品文物深处的细菌或害虫也能很快杀死。环氧乙烷易燃、易爆、有毒，使用时必须注意通风良好。此外，也可用甲醛蒸气进行熏蒸，但效果不如环氧乙烷好，而且甲醛有毒，对眼睛、皮肤、咽喉均有强烈的刺激性。

为了防止消毒后的纺织品文物再度生长霉菌，可将文物装人透明聚乙烯袋中。在聚乙烯袋中通人氮气或放人灭菌防霉剂，同时置于暗箱中避光保存。

喷雾消毒灭菌：当纺织品文物不能用熏蒸方法灭菌时，常用喷射器将灭菌药如除虫菊酯、滴滴涕以细雾喷射到织物上进行灭菌消毒。

库房或陈列室用的橱柜、箱子或家具等，一旦发现有霉菌感染，均应立即用2%～3%甲醛溶液刷洗，彻底消毒。也可用杀菌谱广、快速、高效的过氧乙酸来消毒灭菌。如用20%过氧乙酸在室温下自然挥发熏蒸，或用3%～5%的过氧乙酸加热熏蒸，或用0.04%过氧乙酸溶液反复擦洗，然后用清水冲洗后晾干，均可获得满意效果。

（2）纺织品的加固。[①] 对纺织品文物并不要求有可以使用的机械强度，一般并不要求作什么加固处理。但对那些非常糟朽的纺织品文物，特别是出土时已经糟朽的纺织品文物，如果不作适当的加固处理，往往无法陈列展出和进行研究。对一些残破而有价值的纺织品文物，必须做适当的修复工作。

对于帛画或缯书之类的丝织艺术品，目前最好的办法还是采用传统的托裱法。托裱是一种手工艺操作，要求有平整的裱糊台，裱糊所用的团粉糨糊是用面粉滤制而成，并加有不影响织物强度和颜色的防腐、防霉、防虫剂。在要裱衬的丝帛画（或宣纸画）背面，用软毛笔刷上这种粉糨糊，先加上边框纸，然后再裱衬加固纸。裱衬的帛画用干毛笔刷平贴到光滑的墙壁或木板上，干燥后，使之自然揭取下来。

若文物织品本身严重腐朽，可以用蚕丝在丝网绕线机上制成丝网做衬托。既可单面衬托，也可双面衬托。由于丝线同样也容易遭虫蛀和微生物的侵蚀，现在国内外多采用合成纤维，如用特丽伦纤维来做衬托，既耐久，又不会皱缩和朽蚀。只是容易辨认出修补的痕迹，但对研究、陈列并无影响。

---

① 中国纺织品鉴定保护中心编：《纺织品鉴定保护概论》，文物出版社2002年版。

用合成树脂溶液加固脆弱的纺织品文物，虽能提高织物的机械强度，但使织物容易变硬或使色泽加深，影响质感。曾经使用过5%的可溶性尼龙乙醇溶液、2%的甲基丙烯酸甲酯甲苯溶液和5%聚乙烯醇缩丁醛乙醇溶液等。亦可在加固溶液中适当加些杀菌剂、消毒剂，以防霉菌和害虫。究竟是采用浸渍法、喷雾法或用软毛笔蘸溶液涂刷，要根据具体对象而定。用合成树脂溶液加固纺织品文物中有些已经粉化的织物，是非常必要的，但由于它们会或多或少地影响织物外观，因此除非万不得已，最好不采用。

湖南省博物馆对马王堆汉墓中出土的敷彩织物，采用天然丝胶保护取得了非常满意的结果。蚕丝是由丝素和丝胶两种物质组成，丝胶是丝素的保护物质，具有黏合和增加强度的功能。故丝胶是一种加固丝织品的理想天然材料。

对于已经糟朽的纺织品文物碎片，可以夹在两片特制的能吸收紫外光的玻璃或有机玻璃中保存。在边角上最好衬垫一些软布或软纸，以避免织物直接受压。平放时，勿使织物来回移动。玻璃框四边可用胶布或透明胶带密封，以便与外界隔绝。

（3）纺织品的保存环境。在库房环境中，纺织品文物的保存温度，一般控制在14～24℃之间，湿度控制在50%～60%之间。应根据纺织品的大小、形状，采用灵活的保存方式，尽量不要折叠纺织品。文物库房保持空气清洁，放置防虫、防霉药剂，采用无紫外线照明方式。

在陈列中，展柜必须密闭，起到防尘防有害性气体的作用。同时，展柜要具备调节与控制温湿度的能力。纺织品的展示尽量平放或小角度倾斜，减少纺织品的受力。展厅必须严格控制灯光照明，采用不含紫外线的冷光源，光照度小于50勒。要定期更换展品，避免纺织品长时间的暴露。

3. 纸质文物的保存①

纸是纸质文物主要构成材料。植物纤维是造纸的主要原料，从其化学组成来看主要是纤维素、半纤维素、木质素三大成分。纤维素是由许多个β－葡萄糖基连接而成，在常温下很稳定，随着温度的升高，其抗张强度相应降低，纸张的老化加速。另外，在高温、光照和氧存在的条件下，会发生氧化反应，形成易碎的氧化纤维

① 郭莉珠等：《档案保护技术学教程》，中国人民大学出版社2000年版。

素。温度在0℃以下时,纸张会因内部含有的水分结冰而发脆。但从化学反应速度考虑,温度越低,老化速度越慢,有利于纸质文物的保存。

纸张含适量的水分会使其本身柔软,而具有韧性,干燥的热空气会使纸张中的水分过度蒸发,导致纸张变硬、变脆,易于断裂。与之相反,潮湿的环境会使纸张变潮而发生水解,同时还会使耐水性差的字迹洇化褪色,模糊不清。同时,潮湿的环境还有利于有害微生物的生长繁殖。微生物生长繁殖的最佳湿度一般为70%以上,此时霉菌生长很快,其分泌物中的有机酸会促使纸张加速变质。在长期埋藏过程中,纸张也会吸收地下水中的一些酸性离子。

纸张、糨糊、胶水、装订线等都是霉菌滋生的天然场所和营养库。霉菌对纤维素的分解起着重要的作用,它们吸收纤维素中的营养成分,分泌出一种酶,加速纤维素的水解,同时还分泌出有机酸,增加纸张的酸性。

灰尘的存在也是对纸张不利的,灰尘中含有的不规则形状的晶体颗粒会对纸张造成不可逆转的机械损伤。

考古出土的纸张,由于在地下埋藏时间长,本身已经降解、破坏严重,加之地下土壤中微生物的孢子附着,出土后伴随环境的改变,纸张失水、长霉、老化加速,所以应在考古发掘现场对纸张进行抢救保护。在进入库房之前,纸质文物首先要进行清洗、去酸、加固、修复等操作。

(1) 纸质文物的清洗。用蒸馏水清洗除去纸质文物上的泥斑,清洗之前做"点滴试验",检查是否褪色,如果有褪色,就应进行色彩加固。水洗过程中注意水温,以室温为宜。只要颜料等经得起水洗,一般都会采用湿法清洗,这是最经济也是最常用的方法。

对于脆弱纸质文物不能用水漂洗时,可用水蒸气流来清除灰尘和污泥,其方法是:把纸张放在滤纸上或者放在白布上,这样当通以蒸汽流时,污泥会很快地被吸收到放在下面的滤纸或白布上。另外也可以把纸张放在脱脂棉薄片上,上面再用脱脂棉薄片盖上,然后使蒸汽流来回流动,这样污泥尘土就会被上下垫片所吸收,是一种效果较好的方法。

有些纸张上的污斑,既不能溶于水,又在水溶液中不安全,在这种情况下可以用有机溶剂来处理。常用的干洗溶剂有:乙醇、丙酮、乙醚、苯、汽油、三氯乙烯等。

(2) 纸质文物去酸。纸张变质一个很重要的原因就是纸的酸性存在和增多,酸性加速了纤维素的水解,使纸的机械强度降低。一般纸张的pH值低于5.6时,

就要采取去酸措施。目前有两种去酸方法：湿法去酸和干法去酸。

湿法去酸法，是指将纸张浸泡在碱性溶液中，使之中和，提高 pH 值从而达到降酸的目的。将纸张文物浸入 0.15% ~0.2% 的氢氧化钙水溶液 15 分钟左右，使其酸性被碱中和，取出纸张，用清水清洗后，置于 0.25% 碳酸氢钙溶液中 15 分钟左右，以中和过量的氢氧化钙，使其生成碳酸钙沉淀，并深入到纸张纤维中，成为填料保留在纸的内部。湿法去酸对水溶性字迹材料极为不利，而且在处理过程中，反复浸渍，挤压水分，容易使纸张变形起皱纹，易碎裂。

干法去酸法，可以克服湿法去酸的缺点。可以用氨水、吗啡啉熏蒸纸张，这种方法对字迹、纸张无损。也可以浸渍、喷洒方法并用，将纸张浸泡在有机溶液（如 2% 醋酸镁 - 甲醇、乙醇溶液或 1% 氢氧化钡 - 甲醇溶液以及 5% 氧化镁 - 甲醇溶液）数分钟，取出晾干即可，或者喷洒该溶液再晾干。还可用气相脱酸法，用二乙基锌、吗啉等气化时的气相去酸。

（3）纸质文物的加固、修复。对于破碎的纸张，可以进行粘接、装裱。装裱工艺沿用我国传统的技术，在修裱过程中一定要注意所用材料的选择。装裱糨糊材料为小麦淀粉和高分子物质（如羧甲基纤维素——CMC 黏合剂）。用小麦淀粉为原料时，要加一定的防虫防霉剂，在我国古代常加川椒、白矾等类，现在则多加入 NS851 防霉剂、乙萘酚、对二氯苯、氯酚类等化学药品。

此外，还可以用其他加固方法，如传统的纱纸薄绸修复法、镶嵌托裱法、加膜法、胶黏剂喷涂法。目前，以后两者最为常用。加膜法又称网膜保护法，其方法是在被处理的纸张两面各加一层透明的网膜，利用溶剂或加压来提高纸的强度。丝网加固技术适用于加固糟朽脆弱、破碎的纸张，尤以薄纸见长，特别适用两面书写或印刷的脆纸及遇水（或溶剂）字迹渗化而不便使用传统托裱的纸质文物。其做法是用蚕丝和树脂制成网膜，将纸张夹在网膜中间，在一定温度（80 ~ 140℃）和压力（8 ~30 千克/平方厘米）下加热压合，从而使丝网固结在纸张上。经过处理的纸张具有很好的透明度，能增加纸张的强度，防霉抗老化，有可逆性，能保持原貌。对于比较完整而强度较低的纸质，多用喷涂胶黏剂加固，根据纸张的性质选取不同的胶黏剂，一般用醋酸纤维素的丙酮溶液、聚乙烯醇乳浊液、C - 42 含氟高聚合物、聚丙烯甲脂溶液等。操作非常简便，将胶黏剂喷涂在纸张表面，待其自然挥发，在纸张表而会形成一层保护薄膜，便达到加强强度的目的。

纸质文物的保存要求较高。在库房环境中，温度控制在 14 ~ 20℃ 之间，湿度

控制在50%～55%之间。纸张文物必须采用文物柜、箱、盒三层保存方式，并且文物柜内放置防虫、防霉药剂以及偏碱性物质，用以保证纸张文物的无酸、无生物病害的环境。库房光源采用无紫外线照明方式。

在陈列环境中，纸张文物展柜首先必须密闭，防止展厅环境的空气污染对纸张文物形成威胁。同时，展柜应具备调节与控制符合纸张文物要求的温湿度标准的能力。其次，展厅必须严格控制灯光照明，即光源采用不含紫外线的冷光源，光照度小于50勒。最好是感应式照明方式，设置人体感应电路，只在观众靠近时照亮。要实行定期更换展品，避免纸张文物长时间的暴露。

4．皮革品文物的保存①

皮革主要成分是一种网状组织的蛋白质纤维，是微生物的营养基，这是皮革霉变腐烂的内因，而适当的温度和湿度又是霉菌生长繁殖的重要外部条件。皮革不仅很容易被霉菌蚀损，而且也容易被虫蛀，故防霉杀菌、杀灭害虫、控制合适的温湿度是皮革制品文物保存的关键。

常用五氯苯酚衍生物作浸透剂，或采用月桂酸衍生物作喷雾杀菌。其他如麝香、樟脑、硫酸锌和水杨酸等都曾用作皮革的杀菌剂。皮革文物的杀虫，可采用溶液喷雾法，如将滴滴涕和除虫菊酯的混合溶液喷雾于皮革制品上，或用硫代氰酸脂杀虫剂（如β－丁氧基－β'－硫氰酸基二乙基醚）喷雾杀虫，效果都比较好。熏蒸杀虫法，效果较快，但熏蒸效果不能持久。溴甲烷、二硫化碳等都可作熏蒸剂。

脆弱的皮制品可用甘油、羊毛脂、蓖麻油等保护。对于薄皮革、毛皮可用甘油和水（1∶1）加入蛋黄（一升溶液中用2～3个蛋黄）制成乳剂，再加入0.02%的NS851防霉剂来保护，效果亦较好。对已经变干、变硬、变脆的皮革品文物，需先作处理以防破裂。一般是先用一块湿海绵在皮面上擦拭一遍，然后再用掺有蜡的羊毛脂混合液体进行鞣革。羊毛脂能浸透到皮组织里，使之润滑。蜡不会浸入皮里而是留在皮面上把皮的酥化部分凝固起来。英国博物馆采用的一种配方为：羊毛脂200克、蜂蜡15克、雪松木油30毫升、乙烷（或三氯乙烷）350毫升。美国中央档案馆修整皮革文书的配方比例是：干羊毛脂∶日本蜡∶加司特油∶硬脂酸钠∶蒸馏水＝30∶5∶12∶3∶50。

① 宋迪生等：《文物与化学》，四川教育出版社1991年版。

被水浸泡的皮革或皮革制品类文物，不能立即让其自然干燥，否则会完全失去韧性，难以复原。处理方法之一是先将皮面洗净，用0.02%的NS851丙酮溶液擦皮面，然后把皮件放入110℃的熔蜡中浸半小时取出，在皮件里塞上柔软的纸张，以便冷却时能保持原形，蜡中可加入极少量沥青粉以加深颜色，使皮面显示不出有一层蜡壳。

此外，也可以用聚乙二醇来处理饱水皮革文物制品，如用聚乙二醇1540和聚乙二醇300的混合物溶液将皮革浸泡几天，或把皮革放在蒸馏水100毫升、2克聚乙烯醇和40毫升甘油混合液中浸泡几天后，让皮革自然干燥。

在库房环境中，皮革文物应该采用文物柜、箱、盒多层存放方式，库房温度控制在14～24℃之间，湿度控制在55%～60%之间。文物柜放置防虫、防霉药剂。在陈列环境中，展柜应密闭并具备调节与控制温湿度的能力。展厅应严格控制灯光照明，光源采用冷光源，照度小于50勒。

5. 铁器的保护与保存

古代铁器一出土就面临着生锈腐朽的问题，尤其是在地下已生锈的铁器糟朽更严重，因而对铁器的保护已不容忽视。

铁器是铁与碳的合金，铁器的组成成分有差别，含碳量的多少、熔融温度的高低、冷却速度的快慢、锻打次数的多寡，以及器壁的薄厚等方面导致了铁器不同的化学、物理性质；而且古代的铁器无论生铁、熟铁，其结构都带有微孔和腐蚀通道，这些是铁器腐蚀的内在因素，而水分、氧气、灰尘等都是铁器腐蚀的外部条件。

铁器的腐蚀物是铁锈，主要是铁和氧气、氯化物、水、硫化物之间发生反应的产物。腐蚀层中的渗碳体残余说明腐蚀除化学腐蚀外，还有电化学腐蚀。当器物埋于地下时，还有细菌腐蚀，诸种腐蚀同时发生于铁器，因而地下的铁器会受到不同程度的侵蚀，无一幸免。

铁器的腐蚀也与其他因素有关。有害气体如CO_2、SO_2、H_2S、Cl_2等遇水形成稀酸与铁反应生成各种腐蚀物：碳酸铁、硫化铁、硫酸铁、氯化铁等，氯化铁与水分子平衡后生成新盐酸会继续循环腐蚀。空气中降落在铁器上的灰尘会吸收大气中的水分，从而增加了铁器的水含量。如果灰尘中含有盐类，还会形成电解质溶液而加速铁的电化学腐蚀。

铁器出土后上面不可避免地黏附有泥土，铁器放在空气中也会有灰尘落下。对铁器上的灰尘和浮土可用干净的棉布抹掉或扫刷。坚硬的泥土可用牙签、小刀、

剔针等剔除。

铁锈尤其是铁器内部的锈蚀成分、结构等肉眼不易观察，一般须借用种种分析仪器，如扫描电子显微镜、透射电子显微镜、光学显微镜、电子探针、X 光照相技术等。这些仪器探测后会清楚地显示出器物锈蚀的分布范围、蚀孔的深度和大小、锈层下面的纹饰或文字。如果不具备这些仪器，可用一些简易的方法粗略分析锈蚀情况：用放大镜观察铁器的表层腐蚀情况；用钢针或金属针探测锈蚀层的范围与深度等。

对于铁器的腐蚀的速度可采取失重法和线性极化法。失重法是用样品模拟腐蚀，依据失重前后的重量差来求出腐蚀速度；线性极化法是利用腐蚀电流与极化曲线的关系求出腐蚀速率。

在铁器锈蚀检测中还要分析锈蚀层有无氯化物。同青铜器一样，氯化物是铁器腐蚀的活跃因素之一。检测的办法比较简单，把铁器浸泡在蒸馏水中并加热，再取出浸泡液，加几滴 2 摩尔浓度硝酸溶液，摇匀使酸化，再滴几滴 0.12 摩尔浓度硝酸银溶液，观察是否有白色絮状沉淀出现，若有则说明含氯化物；若无可将硝酸银溶液加大到 2 毫升，再观察，如仍无白色沉淀物出现，说明铁蚀中不含氯化物。

依据检测结果，可按锈蚀程度进行不同办法的清除。通常有机械去锈法、化学去锈法、电化学去锈法。清除氯化物方法很多。水洗法是将铁器浸泡在蒸馏水中，热冷交替，并不时更换蒸馏水，直到将氯化物洗净为止。置换法是把腐蚀铁器浸泡在 5% 的倍半碳酸钠中，每周更换一次新鲜溶液，直到浸液中检不出氯离子为止。另外一种方法是以不锈钢为阴阳两极，用 2% 碳酸钠溶液作电解质溶液，把腐蚀铁器放于两极中间，通入直流电，控制电压和电流密度，即可除掉杂质；或者分别以铅锌为阴阳极，以水为电解液，槽电压在 3 ~ 5 伏左右，将铁器进行电泳清洗，直到除去氯化物为止。

铁器在保存方面，经常用缓蚀剂法来抑制铁锈蚀。铁缓蚀剂的配方很多，常用的铁缓蚀剂酒精溶液配方为：亚硝酸二环己胺:碳酸环己胺:水:乙醇 = 10:10:1:100；含铁的树脂缓蚀剂溶液为：亚硝酸二环己胺:碳酸环己胺:水:乙酸:聚乙烯醇缩丁醛 = 10:10:5:100:5。铁缓蚀剂的操作程序是：先在干燥后的铁器上涂刷一层缓蚀剂酒精溶液，让其干燥，再刷一层含铁缓蚀剂的树脂溶液。

铁器经处理后在大气中还有被腐蚀的可能，因而要即时进行表面封护。表面的封护剂必须具有防潮、耐老化、耐冲击、附着力强、无眩光等特点。传统的方法是

以微晶石蜡为封护剂，把处理后的铁器浸泡在熔融的微晶石蜡中，待气泡不再冒出时，取出药物，用蘸石墨粉的毛刷擦拭，以除去多余的石蜡，消除反光现象。另一种方法是：将铁器浸在配方比为：微晶石蜡∶三乙醇胺∶石油 = 5∶1∶100 的 50℃ 的溶液中，约 10～20 分钟即可。随着科技的发展，以高分子材料作封护剂成为趋势，一般用聚醋酸乙烯酯或有机硅树脂。

封护好的铁器必须妥善保管。鉴于水分是铁器最大的天敌，铁器一定要在干燥的环境下保存，其周围的相对湿度控制在 45% 以下，对于大型的铁器封护后还得对其裂纹、裂缝及其他断裂的部位进行修理、修复、加固等。

6. 铅器的保存

铅的化学性质不很稳定，暴露在空气中的铅器表面很快被氧化形成一层氧化膜，这层氧化膜可防止铅器继续氧化。而埋于地下的铅器则易受各种盐类、地下水中氧气、二氧化碳的腐蚀，表面会形成一层白色锈壳。潮湿环境中的铅器受空气中过量 CO_2 的影响，会发生反应生成白色的碱式碳酸铅，体积也会膨胀，导致器物变形、表面酥粉。另外，铅器还易受有机酸、油脂等物质的污染而产生腐蚀。铅制品的保存除了保持适当的温度和清洁的环境，还要注意器物不能放在橡木制的橱柜中。

思考题

1. 为什么我们必须在考古现场第一时间对出土文物进行抢救与保护处理？

2. 不同地区，地下埋藏环境有何不同？不同种类文物在同样埋藏环境中腐蚀行为有何不同？

3. 论述考古现场建立文物保护大棚的重要性，指出保护大棚应该满足的技术参数与建设标准。

4. 如何做好考古发掘与现场文物抢救的协调工作？以纺织品、象牙为例。

5. 在考古工地临时库房，如何控制温湿度？如何避免阳光和灰尘对文物的影响？

6. 在考古所文物库房和博物馆展厅，如何做好净化空气、防光、防尘的措施？

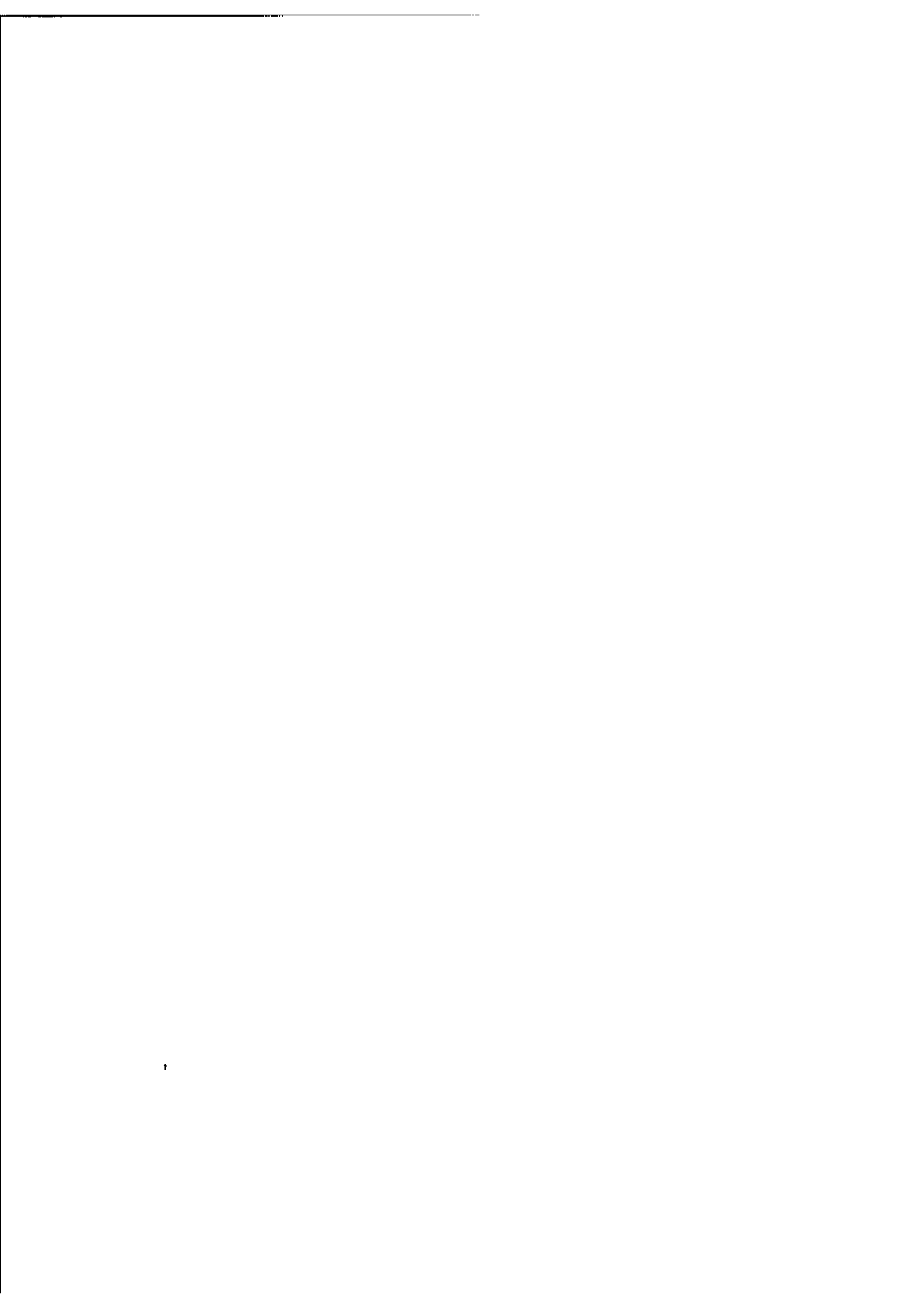
7. 如何理解文物修复与文物保护之间的关系？

8. 举例列出国内外文物修复与文物保护所必需遵行的原则，指出这些原则在实践中可能会遇到的问题。



下篇

遗迹、遗物的分析研究



第九章

考古测年

考古学在一定意义上是“时间”的科学。在获取考古资料之后，接下来就是要对其进行研究，而判断遗迹和遗物的年代，在考古学研究中是最基本的一环，此即考古学上的“年代学”。

考古学的年代可分为相对年代和绝对年代。前者指各种遗迹、遗物在时间上的先后关系，后者指它们的存在距今已有多少年。相对年代的推定一般利用考古地层学和类型学，其曾对考古学研究发挥了重要作用，至今仍在普遍应用。绝对年代主要依靠遗存遗物中的“自铭”年代（纪年铭文）和利用自然科学手段测定。但利用纪年铭文断代仅限在历史范围内且要慎重，如果遗物经过多次的搬迁或长期沿用就不能作为绝对年代判定的唯一标志。对于无文字记载的史前考古学年代的断定，在很大程度上不得不依靠自然科学手段。自从自然科学的断代方法引进考古学或与考古学结合后，史前考古年代学才真正建立在可靠的基础之上。在一定意义上甚至可以说引起了革命性进展①。绝对纪年目前使用最广的有^{14}C法、热释光法、树木年轮法和考古地磁法。基于各种自然规律，绝对年代的测定有不同的方法及适用范围（表9.1）。

---

① ［英］格林·丹尼尔著、黄其煦译：《考古学一百五十年》、文物出版社1987年版、第352页。

表 9.1 常用年代测定法

技术类型	测年方法	测年范围	测年误差	样品物质
放射性同位素	放射性 ^{14}C (AMS)	5 万年以内	0.5% ~ 1% (40 ~ 80 年)	含碳物质(动植物遗骸、泥炭、磷酸盐)
	热释光(TL)	几十万年至数千年	10% 以上	火山物质、火山烘烤砖瓦、陶瓷、烧土、灰烬、陨石、风积物(石英、长石)、磷酸盐、贝壳、黏土、燧石
	电子自旋共振(ESR)	几十万年至数千年	10%	陶瓷器、火烧土、骨骼、石灰岩、火山物质、火山烘烤层、灰烬、陨石等
	钾-氩法(^{40}K - ^{40}Ar)	数百万年至 5 千年		火成岩及其矿物(透长石、黑云母等)、沉积岩同生物(海绿石、钾盐)、陨石
	铀系法(U 系)	50 万年至 5 000 年	百分之几	自生碳酸盐、动物遗骸(骨、牙、贝壳、珊瑚)等
	裂变径迹(Ft)	数百万年至数百年		火山灰、玻璃、石器、陶器、锆石、云母、磷灰石、石膏、石英等高含铀的矿物、陨石
生物规律	树木年轮法	1 万年以内	1 ~ 10 年	植物木质部
物理化学等	考古磁法(热剩磁)	1 万年以内	比较测年	火烧黏土、陶器、砖瓦等
	古地磁测年(沉积剩磁)	3 万年以上	比较测年	黏土、火山灰
	氨基酸外消旋	几百万年至几千年		生物化石(骨骼、牙齿、贝壳等)、磷酸盐类
	黑曜石水合层	几十万年以内	几十至百年	黑曜石制品

各种年代测定方法为研究世界各地的古代文化序列提供了依据,使得考古学尤其是史前考古和古人类学取得了可喜的成绩。但同时,我们对此要有清醒的认识。第一,各种测年方法和实验技术需要不断改进和完善。^{14}C 测定是目前最成熟、最可靠的方法,它也存在一定的缺陷,如由于放射性衰变的统计涨落和其他偶然误差,其精密度一般为几十年,因此要作树木年轮校正。第二,科学合理地采集

样品。样品的采集地点、文化层归属应准确无误，既要注意样品形成年代与其地层堆积年代是否一致，又要注意周围环境。在实际工作中，一般是分层采样，同一层位采集多种样品，同时用两种或两种以上的方法测年。

第一节　树木年轮断代方法

树木年轮断代法（Dendrochronology），简称树轮纪年法，是20世纪由美国天文学者道格拉斯（A. E. Donglass）建立的。早在1929年，工作人员就用该法测定了印第安人遗址的年代，使该遗址的年代更明确①。20世纪60年代以后，统计学和计算机为建立长期连续的树轮年代学提供了可能，树木年轮法逐渐被广泛应用于世界各地的考古学、建筑学、美术史方面。

一、树木年轮法的原理

树木年轮法的原理非常简单。树木每年春长秋止，并且在树干截面上形成疏密相间的圆圈，被称为年轮。每年一轮（或二轮），树木截面上的年代数目代表该树的年龄。轮与轮间的距离为轮距，轮距并非均等，它与当时气候条件密切相关。气候温暖湿润，植物生长旺盛，轮距就宽；如果干旱少雨，树木生长缓慢，则轮距就窄。而同一气候中同种树木的不同个体，在同一时期内轮距及其形状是一致的。

如果一棵活树内层的一段年轮谱同死树的外层年轮谱相似，就说明死树是前一阶段生长的，两者可以衔接起来。死树又可以同更老的死树衔接，依次类推，衔接不同时段轮距就可建立这一地区的主年轮序列（又称标准轮距序列、树木合成年轮表）（图9.1）。要说明的是，树木合成年轮表必须是同一气候区内，由同一树种的树木年轮图谱衔接而成。美国、爱尔兰，利用现生古树与泥炭地层、考古遗址出土的古树、古木桩，建立了全新世10 000年来的树木年轮标准序列②。从实践来看，以该法建立的标准序列年谱和日历吻合。

---

① 光谷、拓实：《树轮纪年法》，《现代自然科学技术在考古学中的应用》，西北大学出版社1992年版，第54页。

② Ferguson C W. A 7104-years Annual Tree-ring Chronology for Bristlecone Pine, Pinos Aristate, from the White Mountain, Califonia. Tree-ring Bulletin, 1968, 29: 3 – 29.

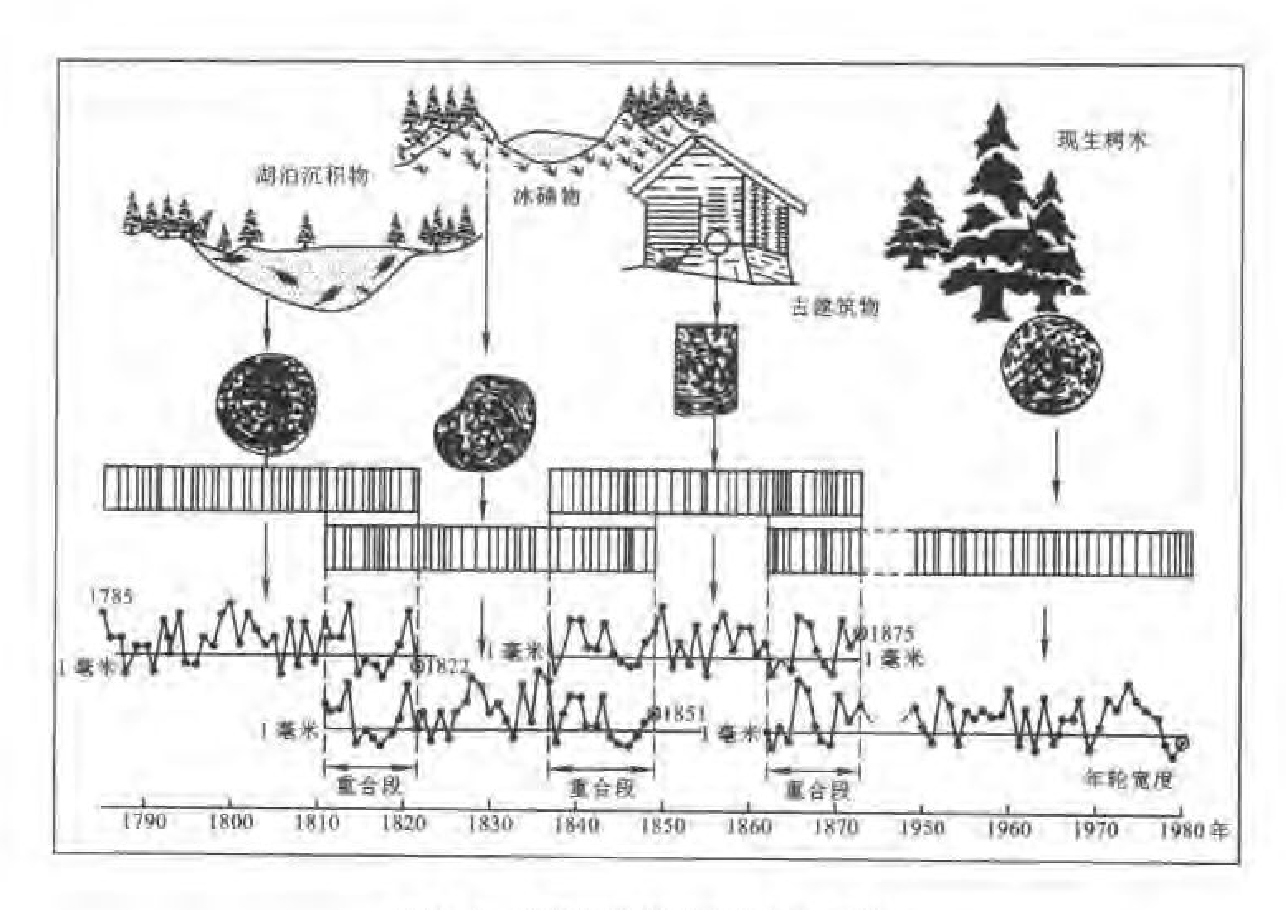


图9.1 树轮年代序列的建立示意图

对照树木合成年轮表，就可以分析考古发现的木头样品的年代。首先分析考古遗存中木材年轮，建立该样品的树轮图谱。再将该样品的树轮图谱（只要其年轮数超过60～70圈），与建起的主年轮序列表对照，找出唯一的重合位置，就可判定其生、死绝对年代（图9.2）。精确度可达数年误差。

值得注意的是，树种的选取须满足标准年轮产生的条件，即一个生长季只增加一个年轮，且对限制生长因素敏感，最好是寿命较长、分布较广的树种。美国选择松科针叶常绿树种，欧洲选择栎树，我国则选取柏树。

二、树木年轮测定法

首先，采集样品。视情况采集木材圆盘，或采集木材钻心。

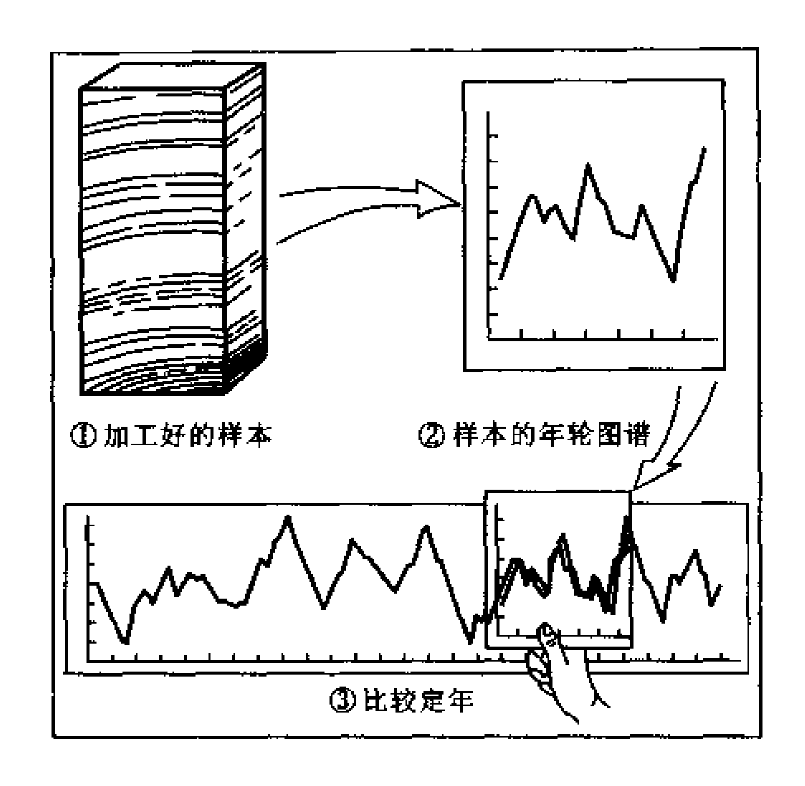


图9.2　未知年代样本的定年

采自王树芝:《树木年轮分析在考古学研究中的应用》,《中国文物报》2001年5月16日第7版。

接着,用磨光机或砂纸打磨、擦磨样品,使其表面光滑,以便获得清晰的年轮结构。

然后,用树轮测年系统进行测量。中国社会科学院考古研究所考古科技中心使用的是LINTAB树轮测量系统①,由双目体视显微镜、水平移动平台和计算机组成。测量方向是从髓心到树皮。具体操作为:先将体视显微镜中一个带十字的目镜十字线对准要测的年轮,用手摇动手柄,使活动平台水平移动来带动平台上的样品移动,移动至十字线对准要测量的下一个年轮,按鼠标左键,如此这段水平距离由传感器转换为相当于这个年轮宽度的信号输入计算机,通过计算机的记录、保存年轮宽度数据,在计算机屏幕上就显示出年轮图谱。

最后,将所获的年轮图谱与已建立的标准图谱相比较,便可断定其年代。

中国社会科学院考古研究所考古科技中心树轮分析室对河北磁县湾漳墓木材进行了树轮分析,建立了该墓中柏木的177年的浮动年轮年表,并根据年轮结构对

① 王树芝:《树木年轮分析在考古学研究中的应用》,《中国文物报》2001年5月16日第7版。

树木生长的生态环境进行了推测①。

三、树轮纪年校正法

树轮纪年法除了判定年代外，还可以对^{14}C法进行校正。^{14}C法的测年并非日历年代，而树轮校正曲线是把^{14}C年代转变为日历年代的重要工具。树木年轮每年生长一轮，其^{14}C放射性水平反映了当年大气CO_2放射性水平，用树木年轮方法得出年轮生长年代是很可靠的。因此若测出某个树木年轮的^{14}C年代，就可以对^{14}C年代进行校正。这样依次测定即可建立^{14}C年代与树轮年代相应于日历年代的对照表。也就是说，通过在同一气候中采集同一树种，按照树轮年代的早晚使其前后相接、顺序标记，再取树轮木质进行^{14}C测年，就可绘出^{14}C—树轮年代的校正曲线(图9.3)，图中树轮的^{14}C年代为纵坐标，横坐标为树轮生长的年代即日历年代。

由于各种原因如太阳活动、地磁场变化的影响，树轮校正曲线是一条扭摆波动的不规则曲线。目前已可校正 8 000 年以内的^{14}C年代②。1993 年的高精度校正曲线的年代上限可推到距今 10 000 年；迄今已积累近 1 200 对以上的对照数据。1986 年，由 M. Stuiveer 和 G. W. Pearson 等人研究建立的高精度^{14}C—树轮年代校正曲线，误差只有 15 年左右③。

树轮纪年法精确度很高，甚至误差可到一两年，但也有一些问题。首先为建立标准序列，研究人员得付出若干年的艰苦劳动。其次，国际上通行以美国高山生长的刺果松树轮标准序列，目前衔接到 8000 多年前，其研究范围受限制。另外这个树轮测量是否能通行于全世界，目前仍无统一方法。还有，对伪年轮或缺年轮的识别、树种的挑选、轮距序列的互校，以及某些树木的特殊生长环境和气候的影响等都会造成一定误差。此外，墓葬或遗址中的木材，是否是当时使用的木材，抑或是砍伐已久、流传已久的木材，标本是否取材于树皮附近的年轮层等也制约着树轮纪年法的结果。

---

① 王树芝：《树木年轮分析在考古学研究中的应用》，《中国文物报》2001 年 5 月 16 日第 7 版。

② 蔡连珍：《^{14}C年代测定——史前考古断代方法之一》，《考古与文物》1980 年第 2 期。

③ 张雪莲：《夏商周断代工程中^{14}C测年是怎样参与解决历史时期年代问题的》，《中国文物报》2001 年 12 月 28 日。

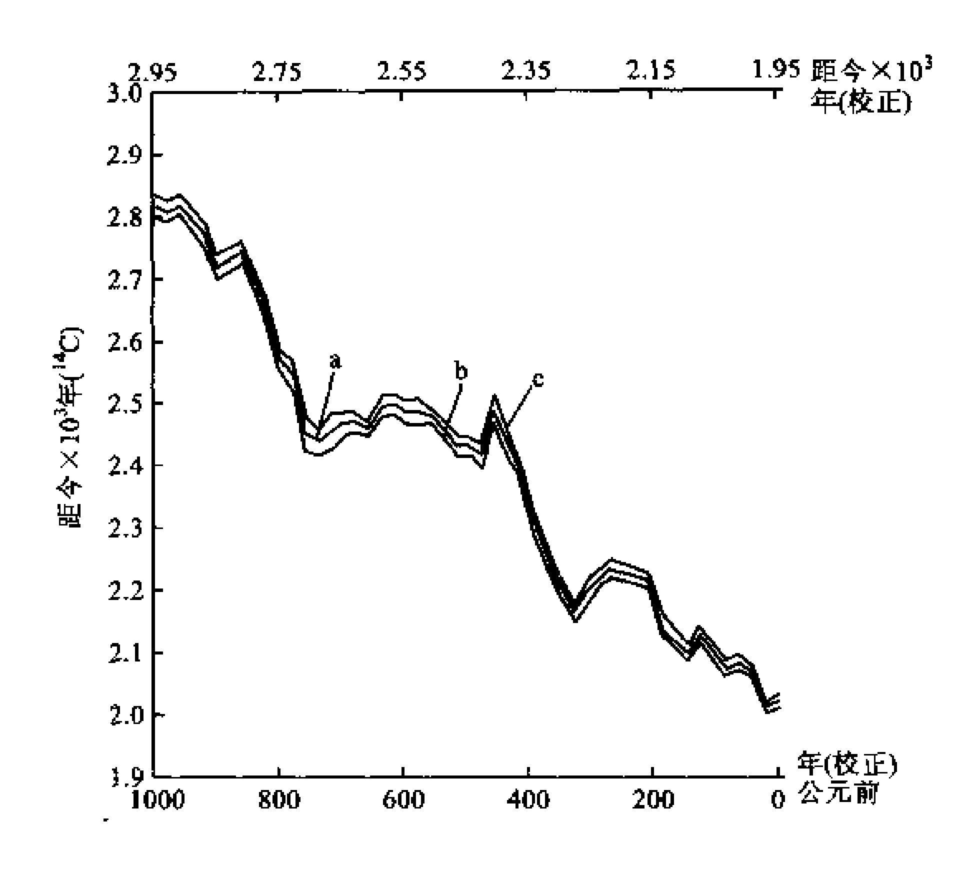


图 9.3　^{14}C - 树轮校正曲线

采自张雪莲等:《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》,《考古学报》2003 年第 1 期。

第二节　碳同位素测年技术

碳 - 十四测年法又称放射性碳素断代法(Radiocarbon Dating),一般写作^{14}C。^{14}C断代方法由美国芝加哥大学利比(Libby)教授于 1949 年提出,同时公布了第一批^{14}C 年代数据①,随之得到很快的发展。在国外,^{14}C 测年法的成功震动了考古界和地质学界,它使多数国家的史前年代学产生了很大变化,有了一个统一的时间尺度,世界各地的史前考古年代序列由此而逐渐清晰起来,被人们喻为"放射性碳素

① Libby W F et al. Age Determination by Radiocarbon Contents; World Wide Assay of Nature Radiocaron. Science,1949,109:227.

的革命"①。我国学者夏鼐于1955年开始向国内介绍^{14}C测年法，并亲自筹建实验室，自20世纪六七十年代起此技术在我国得以较多使用，目前已获得数据万余个。

^{14}C技术之所以在国际范围内得以普遍推广，是由于其理论完整，又采用了现代精确测试技术，特别是近年来对一些技术的改进，如利用校正曲线使测量结果直接转换成样品实际年龄、样品制样方法和技术的提高，加速器质谱仪和微型计算机的使用更增加了其测定结果的精确性。^{14}C测年法应用范围日益扩大，它不仅用于考古学中，而且在第四纪晚期地质年代学、古气候学、古地理学、海洋学等也广泛使用。

一、^{14}C测年原理

同位素（Isotope）是指质子数相同而中子数不同的原子。同位素具有相同的核外电子数，故它们的化学性质基本相同②。同位素可以分为两类，即放射性同位素和稳定同位素。凡能自发放出α、β、γ射线的同位素，称为放射性同位素。与之相反，不能自发衰变的同位素则称为稳定同位素。

自然界存在三种碳的同位素：^{12}C(98.9%)、^{13}C(1.19%)、^{14}C(10^{-10}%)，前两者比较稳定，而^{14}C属低能量的放射性元素。^{14}C的产生和衰变处于平衡状态，其半衰期（剑桥半衰期）为5 730 ±40年（现在仍使用利比半衰期5 568 ±30年）。^{14}C的衰变过程，在地球上任何地方都一样，与所处的经纬度、高度等地理位置无关，也不受外界普通物理作用（如压力、温度等）的影响，亦不受所接触的物体化学成分影响。

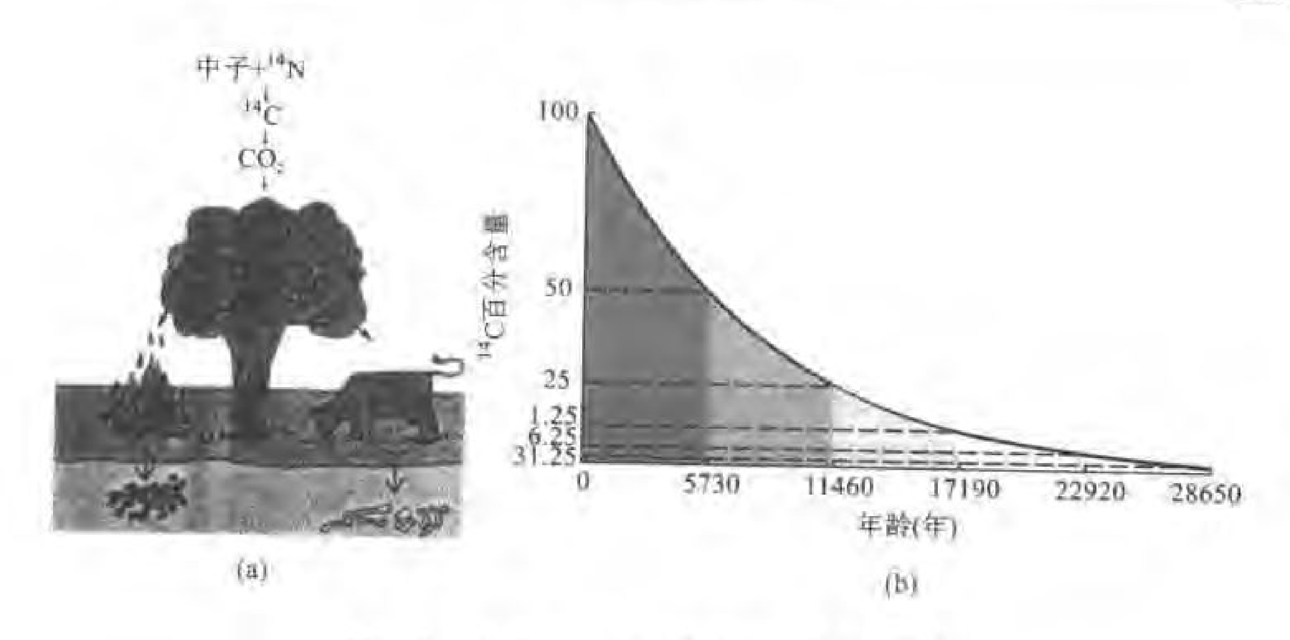
宇宙射线同地球大气发生作用产生了中子，当热中子击中^{14}N发生核反应并与氧作用便产生了地球上的^{14}C。在大气环境中新生^{14}C很快与氧结合成含^{14}C的$^{14}CO_2$，并与原来大气中CO_2混合，参加自然界碳的交换循环[图9.4(a)]。

植物通过光合作用吸收部分放射性碳，动物又直接或间接地吃植物，因而所有生物都含有^{14}C，且^{14}C又不断地衰变成^{14}N。由于循环作用，所有的有机体都会通过新陈代谢使其体内的^{14}C浓度与大气中^{14}C的浓度保持动态平衡。一旦生物体死亡，其放射性碳物质与周围环境的交换就会停止，且其中的^{14}C含量就按照放射

---

① 引自夏鼐：《碳-14测定年代和中国史前考古学》，《考古》1977年第4期。

② 郑永飞、陈江峰编：《稳定同位素地球化学》，科学出版社2000年版。



(a)　(b)

图 9.4　^{14}C 的产生、分布示意图及其衰变规律

(a) ^{14}C 的产生及其在自然界中的分布示意图　(b) ^{14}C 的衰变规律

采自科林·伦福儒、保罗·巴恩著，中国社会科学院考古研究所译：《考古学：理论、方法与实践》，文物出版社 2004 年版。

性衰变规律逐渐减少，经过 5 730 年减少为原来的一半；衰变过程中放射出 β 粒子（$^{14}C \to {}^{14}N + \beta$）[图 9.4(b)]。因此，可以计算出生物与大气停止交换的年代 t，即推算出生物死亡的年代，其表达式为：$A_t = A_0 e^{-\lambda t}$，式中 A_t 为衰变了 t 时刻时体内的^{14}C 浓度，A_0 为初始状态体内^{14}C 浓度，λ 为衰变常数。只要知道某生物的^{14}C 含量，通过与其初始浓度比较，便可得到该生物的死亡年代。

要说明的是，^{14}C 测年法基于几个假设条件之上：

（1）假设大气中^{14}C 的产生率不变。地球上的交换碳中^{14}C 含量近数万年来基本恒定，但 19 世纪后半叶工业活动的增加，20 世纪原子弹的爆炸形成的工业效应、原子弹效应，已减少了大气中^{14}C 的含量。

（2）假定放射性衰变规律不变，不受任何外界环境的影响，生物样品一旦死亡就会停止与环境中的碳储存库进行自由交换且开始衰变。

（3）地球上各交换库中^{14}C 的放射性比重不随时间、地点、物质种类而改变，这个假设经检验基本成立。国际公认^{14}C 测年中的起算点是 1950 年（因为之后人工

核爆炸产生的大量^{14}C对大气影响很大),1850—1950年间的样品因工业化过程释放的CO_2使得^{14}C测年数据稍偏老。所以,所有的^{14}C年代数据都有标准偏差,即其真实年代实际上只有68%的概率在此数据范围内。由于各种因素都有可能引起误差,所以需要一系列的数据才可靠。

二、^{14}C测年步骤

首先,采集样品。需要注意:

(1)采样时应考虑样品的损失,应适当增加样品的采集量。各类样品的采集量要求不尽相同,一般按表9.2选取。

表9.2 ^{14}C样品采集重量表

物质	木头	木炭	贝壳	骨头	泥炭	种子	毛发编织物	碳石灰	铁器
重量(克)	100	50	300	1 000	500	100	100	1 000	1 000

采自崔晓林:《碳十四测定年代》,《中国文物报》1994年3月27日第2版。

(2)保证样品不受污染,避免现代含碳物质混入样品中。注意采集的地层,以免其他不同时代含碳物质的混入,如考古发掘现场木炭的提取等。

提取样品后,采取适当的方法使其慢慢干燥。

样品送到实验室后应先清除受污染的表层,接着对样品进行测试。^{14}C断代法是探测^{14}C在半衰中所放出的β粒子,将样品放进专门设计的β射线高效探测器内,并在特制的屏蔽室里进行测量。测量采用的记数装置有两种:气体正比计数器和液体闪烁计数器。当β粒子穿过计数器时会发出电信号或者荧光。同时,还要测定标准样品中(^{14}C含量已知)放射性强度和本底计数,以便将计数转换成^{14}C含量。

最后,是对年代进行推算。在计算过程中不可避免地会出现统计误差、实验误差、同位素分馏效应、现代碳标准(降低)①,所以最后的计算结果都要进行树木年轮的校正,通过^{14}C年代—树木年轮年代校正校准,将^{14}C年龄转换为日历年龄。受树木年轮法的限制,对于年代值大于8000年的样品,尚不能用树木年轮校正曲

① 蔡莲珍:《^{14}C年代测定——史前考古断代方法之一》,《考古与文物》1980年第2期。

线来检验与校正[①]。目前得到国际公认的、最新的高精度曲线是1998年^{14}C—树木年轮校正曲线。要指出的是，通过常规衰变记数法或同位素比值法所获的样品^{14}C年代值，还需对直接测量值进行标准样校正和本底校正，常规法还要做淬灭校正。此外，由于样品的同位素分馏效应，还需对样品的^{14}C年代进行$\delta^{13}C$校正。

^{14}C断代法是目前最精确的测年方法，具有许多优点：

（1）测量范围广，可测定1 000—50 000年内的考古样品。

（2）样品易得，凡是含碳的骨头、木质器具、焦炭木或其他无机遗留物均可。

（3）对样品要求不严，埋藏条件不要求，取样也很简单。

尽管如此，^{14}C断代法仍存在一些问题：

（1）测量范围有限，而且样品年龄愈老，愈接近极限值，测量误差愈大[②]。

（2）合适的样品难以采集，要满足纯粹不受污染而且要求一定的重量。如古代样品在埋藏中易受到后代动植物腐烂后的可溶碳化合物的污染；一些珍贵样品不能大量取样。

（3）必须使用大量的样品，而且测量时间较长。

（4）因种种原因，过去大气中的^{14}C放射性水平不稳定、^{14}C粒子衰变本身的波动性，那么用现代统一的^{14}C标准测定的年代不能等同于日历，只能是^{14}C年代，现在这个问题已得到解决，即用树木年轮法校正。

三、加速器质谱^{14}C断代方法

在考古研究中，有许多珍贵的文物，其所含的碳量有限，^{14}C常规测年法就显得无能为力。针对^{14}C常规测年法的局限性，20世纪70年代末加速器质谱^{14}C计数法应运而生，以1978年在罗切斯特大学召开的第一次国际加速器质谱会议为诞生标志。

加速器质谱测年技术（Accelerator Mass Spectrometry，AMS）与^{14}C年代法原理相同，都是基于测样中^{14}C同位素原子数随时间按指数函数衰变的规律，只是二者的所测物理量和测试技术有别：前者以对^{14}C原子计数代替对β粒子的计数，即计测样品中现存的^{14}C原子数，或者更准确地说是测定样品中^{14}C与^{12}C原子总数的

① 陈铁梅：《应用于考古学中的年代测定方法综评》，《考古与文物》1980年第3期。

② 陈铁梅：《我国旧石器考古年代学的进展与评述》，《考古学报》1988年第3期。

比值(同位素比值),而后者是测量样品中发生衰变的^{14}C原子数。具体地说,就是将^{14}C样品经化学制备后引入到加速器的离子源,经电离后加速到高能,再应用电荷剥离技术、射程过滤技术,以及$\Delta E-E$探测技术、等离子分离鉴别技术,把^{14}C离子挑选出来,以实现对单个^{14}C原子进行计数。

加速器质谱计数方法的样品化学制备过程与常规法相同,从样品中将碳提取出来,制备成纯化学物质。由于加速器质谱法的样品使用量为常规法的千分之一,相应地,使用的操作系统也要微型化(图9.5),同时制备中的防污染要求也较常规法严格得多。



图9.5　北京大学加速器质谱^{14}C制样系统

采自吴小红:《北京大学碳十四年代测定研究》,《中国文化遗产》2004年(秋季号)。

为了使加速器质谱法中产生离子,必须将微量的碳样制成离子源中的样品靶。样品靶的要求也极为严格,它必须能产生持久稳定的、有一定强度的离子束①。

AMS是加速器技术、质谱技术和探测鉴别技术的产物,具有一些优点。首先AMS所需样品量少,一般1~5毫克就足够了,甚至20~50微克。其次,精确度高,灵敏度可达$10^{-15}\sim10^{-16}$,误差能达到不超过0.3% ±18年。第三,测定年代

① 仇士华:《碳十四断代的加速器质谱计数方法》,《考古》1987年第6期。

扩展到 7.5 万 ~ 10 万年。第四,测量时间短,一般几十分钟就可测试一个样品①。还有,AMS 不受环境影响,不像 β 线计数要考虑宇宙光体。AMS^{14}C 断代法自问世以来,广泛应用于考古学、古人类学、地质学、物理学、天体物理学、环境科学、生物医学等领域。

AMS 超过^{14}C 常规断代法对新石器时代完整年代序列的成就,因其取样少(加速器质谱仪使用小样品或含碳量极少的样品)给^{14}C 分析带来了新的途径,甚至可以解决其他问题,诸如陶器起源的追溯、人类祖先何时到达美洲、农业起源的时间等问题②。

AMS 对墓地的测年及相关信息的获得极为有用,如在北非及与非洲相接的部分欧洲地区,发现数个 30 ~ 200 人不等的更新世结束时期的墓地和小型居址,用 AMS 法测定墓地骨架的年代,得知大多数人死于一次暴力事件。对叙利亚的研究中,用 AMS 测定作为食物残渣的动物骨头年代,发现了主要家畜种类的分布范围和发展地区③。

在意大利都灵大教堂保存一块十字军东征时带回的麻布,布上褪色的血迹显示出的人形是一个留胡须的、遭鞭笞并被钉过十字架的男子形象,长期以来被人们认为是基督耶稣的"圣裹尸布"。裹尸布是否真是耶稣蒙难的遗物,几百年来一直争论不休。19 世纪末至 20 世纪上半叶,摄影专家的影像似乎说明它是真的,但反对者仍坚持这是一个不知名的画家的杰作。1986 年,意大利都灵召开了一次专题技术讨论会,与会者达成协议,同意用 AMS 进行年代测定:从包布上抽一根线分成数段,在世界上著名的七个^{14}C 实验室对其进行加速器^{14}C 断代测量,证明这块黄色的织物为中世纪所伪造。而 1988 年,三个实验室又用^{14}C 法测定,认为其年代为 1260—1390 年之间。1999 年希伯来大学的植物学家阿维诺姆·达宁对布上的花粉粒和植物图形分析,认为这块布出自 8 世纪以前的耶路撒冷附近④。目前,似乎认为布是真的占了优势,但是关于耶稣裹尸布的疑云在不久的新的科学实验中将

① 仇士华:《加速器质谱计数法》,《中国碳十四年代学研究》,科学出版社 1990 年版,第 89—90 页。

② 陈铁梅:《彭头山等遗址陶片和我国最早水稻遗存的加速器质谱^{14}C 测年》,《文物》1994 年第 3 期。

③ [美]弗里德·温多夫:《加速器质谱技术在田野考古上应用的进展》,《考古学的历史·理论·实践》,中州古籍出版社 1996 年版,第 176—182 页。

④ 《历史谜题之四:耶稣裹尸布的疑云》,《参考消息》2000 年 8 月 6 日。

会得到解决。

我国学者原思训用加速器质谱法测定了1件出自兴隆县的纹饰鹿角①。该鹿角系采集品，长12.5厘米，上面阴刻三组精美纹饰并染成红色，同时采集的有最后斑鬣狗、赤鹿等动物化石。由于没有足够数量的伴出样品供$\beta^{14}C$计数法测年，且同时收集的动物化石年代据推测在距今万年之前，只有采用$AMS^{14}C$法直接测定鹿角本身，既不损坏鹿角，又能获得比较准确的年代。

样品取自底端没有纹饰的部位，重0.46克。接着，对样品进行前处理和进行测年用石墨的合成。先刮除骨样表层，用3%盐酸溶去骨样的磷酸盐及碳酸盐等无机组分得到胶原物质，用稀碱除去可能存在的腐殖酸污染，胶原在pH=3的80℃热水中长时间浸泡得到明胶，离心分离出不溶残渣，冷冻干燥明胶溶液后得到固体明胶。木炭样品采用标准酸、碱、酸前处理程序。

明胶或木炭燃烧后得到CO_2后，和一定比例的H_2混合，用Fe粉催化还原制成石墨

$$CO_2 + 2H_2 \xrightarrow[\Delta]{Fe} 2H_2O + C(\text{石墨})$$

用制备出的石墨作靶，经加速器质谱^{14}C法测量，结果为13 065±270(BP)。这个结果与同时收集的动物化石年代基本符合。

AMS除了应用到考古学研究外，还能识别并直接对其他一些放射性元素如^{36}Cl(氯同位素)计数②。

AMS的推广目前尚存在一些困难，如造价昂贵、技术要求高。此外，在技术应用方面有本底干扰大之弱点。尽管如此，AMS的发展前景仍被十分看好。

---

① 原思训:《加速器质谱法测定兴隆纹饰鹿角与峙峪遗址等样品的^{14}C年代》,《人类学学报》1993年第12卷1期。

② [美]弗·温多夫著、郭庆春译:《加速器质谱技术在田野考古应用的进展》,《中原文物》1995年第4期。

四、^{14}C 年代数据的校正

（一）单个样品^{14}C年代的校正

受地球磁场的作用，大气中^{14}C的浓度是变化的，这样基于其不变的假设进行的^{14}C法就需要进行改正或校正。常规^{14}C法和AMS^{14}C法所测得的样品年代为^{14}C年代，必须经过树轮曲线的校正，即从树轮校正曲线上找出^{14}C数据对应的树轮年代，再根据^{14}C年代的误差找出相应的树轮年代范围，这就完成了^{14}C年代到日历年代的转换。

单个样品的^{14}C年代经过树轮校正后，其置信区间一般要展宽。年代较好的^{14}C精度是0.5%（相当于±40年），当它经过树轮校正后，受树轮校正曲线的影响，相应的置信区间增加1倍。也就是说，单个^{14}C样品经测量、校正后68.2%的置信区间一般要大于100年。100年对于史前时期，影响不大；可用于历史时期，就不能满足断代的要求。

（二）系列样品^{14}C年代的校正

受多种因素制约，单个^{14}C样品的校正值在考古断代中存在较大困难，特别是在^{14}C向日历年代的转化过程中的误差加大，如图9.3^{14}C年为2.45×10^3，转化后的年代可能是a、b、c三点所对应的日历年，年代跨度达300多年。为了使误差减小，从20世纪80年代开始国际上使用系列样品的方法来提高^{14}C年代的置信度。90年代后，随着高精度^{14}C—树轮年代校正曲线的建立，高精度系列样品法逐步建立、完善，不仅使误差大大缩小，而且避免了由于曲线上的特定位置所引起的误差增大。

所谓系列样品是以它们日历年代的相互关系联系在一起的。考古中常见的系列有间隔已知（如树轮序列，年代清晰可数，间隔清楚具体）、顺序已知（如有直接叠压的地层关系）、考古分期（如成熟的考古学分期序列）几种系列①。由于形成三种系列的条件不同，所得到的日历年代误差也不同。高精度系列样品即指在年代上前后连续，且有一定时间间隔的一系列含碳的考古学样品。

系列样品法的^{14}C年代转换通过系列样品曲线拟合转换而成，它依赖^{14}C测量的高精度和校正曲线的高精度。该法是先对系列样品进行测年，在此基础上将所

---

① 郭之虞、马宏骥：《如何看待与使用系列样品^{14}C年代校正方法》，《中国文物报》2002年6月21日第5版。

测得的年代小段在树轮校正曲线上的相应时段进行曲线拟合，以确定所需要的时间点。高精度系列样品法就是“在测量精度达到一定水平的基础上，将得到的符合系列样品条件的考古样品的测量结果，通过贝叶斯统计方法与高精度^{14}C—树轮曲线匹配拟合，得到最终的日历年代范围。”①

目前，处理系列样品^{14}C年代校正的拟合方法主要有目测法、最小二乘法和贝叶斯方法。目测法是将系列样品的测年结果，通过目测与树轮曲线进行拟合。刘若新、仇士华等先生用目测法测定了来自长白山火山灰中的样品，拟合后结果为1 215 ±15 年②。

最小二乘法是用最小二乘法对所测系列样品的结果进行数据处理，再进行曲线拟合的。这实际上是一种曲线拟合的方法，仅适用于日历年代间隔已知的系列样品，如树轮系列样品。目前典型的程序是荷兰格罗宁根大学开发的Cal20。1986年，Pearson用此法对一块考古发掘得到的木头进行了测年断代，求得其年代为公元809 +24 至公元809 -13 年③。

贝叶斯方法是采用贝叶斯统计学方法，提供统计运算进行拟合，以求拟合误差最小。这种方法目前主要应用树轮系列和地层系列。放射性碳衰变的随机特性和高精度校正曲线的建立以及^{14}C年和日历年的对应关系符合贝叶斯统计的应用条件，即将一些样品日历年代的信息作为先验条件加入到计算中，其典型的程序是OxCal程序。该程序是应用贝叶斯统计，通过Gibbs取样进行计算。该程序将^{14}C年代数据和考古学家所提供的相关信息输入到计算机，在使用时能考虑诸多因素，能自动进行拟合，计算分期和系列样品的概率分布。在OxCal程序的计算过程中，对于没有先验的情况下是采用均匀分布，而考古材料有地层与分期，可以给系列提供开始和终止时间，因而可以进行边界设置，改进先验分布，使之更接近实际。在使用OxCal程序时，一定要注意理解程序的命令含义，对于符合率低的数据要剔除。贝叶斯方法目前尚有争议，其焦点在先验条件的设置及其作用，有人为加工成分，可能会降低准确性。所以，用此法时一定要慎重，地层系列和树轮系列要确凿

① 张雪莲、仇士华、蔡莲珍：《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》，《考古学报》2003年第1期。

② 刘若新、仇士华等：《长白山天池火山最近一次大喷发的年代测定》，《中国科学》1997年第5期。

③ Pearson G W. Precise Calendrical Dating of Known Growth-Period Sample Using a “Curve Fitting” Technique, Radiocarbon, 1986, 28(2A): 292 - 299.

无误,考古信息的可靠性与完整性尤为重要。

系列样品的组织极为重要。原则上,一个系列在时间上要有足够长的跨度,至少要超过树轮曲线扭摆波动的周期。在树轮曲线的平台段,则至少有一端延伸至平台以外。对于考古分期系列样品,在一个分期中要有一定数量的样品,最好在5~6个以上,且各期的样品数量不要相差很大。

夏商周断代工程应用^{14}C测年法解决了一系列的年代问题,建立起三代^{14}C年代框架,为三代年表的建立提供了有力的依据。工程所得到的日历年代是将所测得的^{14}C年代通过^{14}C—树轮年代校正曲线转换后得到。针对日历年代误差产生的三个方面——^{14}C测量误差、^{14}C—树轮年代校正曲线本身的误差和^{14}C—树轮年代校正曲线上的位置——为减小测量误差,专家们对常规法^{14}C测年技术、骨质样品的制备、加速器质谱测年技术进行了改造和研究,使最终常规测量精度可达3‰,加速器质谱法精度达5‰。为减小第二个误差,使用了高精度^{14}C—树轮年代校正曲线,使^{14}C年代误差只有15年。第三个误差的解决是通过高精度系列样品法①。夏商周断代工程用高精度系列样品法定出了从二里头文化到西周的考古学文化分期的年代框架。例如,陕西长安马王村发现的H18系列地层,时间上跨越了先周、周初和西周中期,专家选取了木炭、骨头、一年生小米的系列样品,由此测定的武王克商为公元前1050—公元前1020年,误差为30年,与天文学的推定相吻合。

以琉璃河西周墓地的高精度测年为例②,从考古分期来看,琉璃河墓地分为三期六段,时间从西周早期一直沿用到西周晚期,该遗址背景清楚,取样研究意义重大。

第一步,是样品的制备过程。所取样品为M1193椁木和三期六段墓葬出土的人骨、兽骨。样品的初步处理包括:将M1193的椁木锯成5段,每段厚约10厘米,表面刨平,作年轮图像扫描,并将5段木头排序、标出标记(每10轮为一标记,从树皮向树心依次标为A-B-C-D-E-F),最后将具有相同标志的树轮合并,并劈成小薄片混匀。选取保存完好的骨头样品,按文化分期顺序排序。

样品的前处理和化学处理:将木头中的土等夹杂物去除后,把木头劈成约0.5厘米×3厘米的小条依次放入1当量浓度的盐酸溶液、2%氢氧化钠溶液中浸煮,

① 张雪莲:《夏商周断代工程中^{14}C测年是怎样参与解决历史时期年代问题的》,《中国文物报》2001年12月28日。

② 张雪莲、仇士华、蔡莲珍:《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》,《考古学报》2003年第1期。

之后在蒸馏水中洗至中性，干燥备用。将骨头清理干净后，去除其中夹杂的泥土等，然后清洗、烘干。再称取适量的骨头，破碎成约 1 立方厘米的小块，在 0.5～1 当量浓度盐酸溶液中浸泡，制得骨胶原，碱处理后调整 pH 值水解成明胶，干燥，密封备用。

用国产 DYS－92 型低本底液体闪烁仪器测量，对样品、本底及现代碳采用循环测量，每个样品每次测 10 分钟，累计测量不少于 2 000 分钟。

第二步，作 $\delta^{13}C$ 值的校正。对于样品的同位素分馏效应，通过样品的 $\delta^{13}C$ 值进行校正。

第三步，年代的转换。根据样品的考古学信息，对所测的样品 ^{14}C 结果进行日历年的转换。

从这次工作的结果看，琉璃河 M1193 椁木拟合后的年代为公元前 1032—公元前 992（图 9.6、图 9.7、图 9.8、表 9.3），晚于武王克商的年代（由沣西 H18 及其地层所定的公元前 1050—公元前 1020 年），与考古学家认定该墓为成康时期一致。

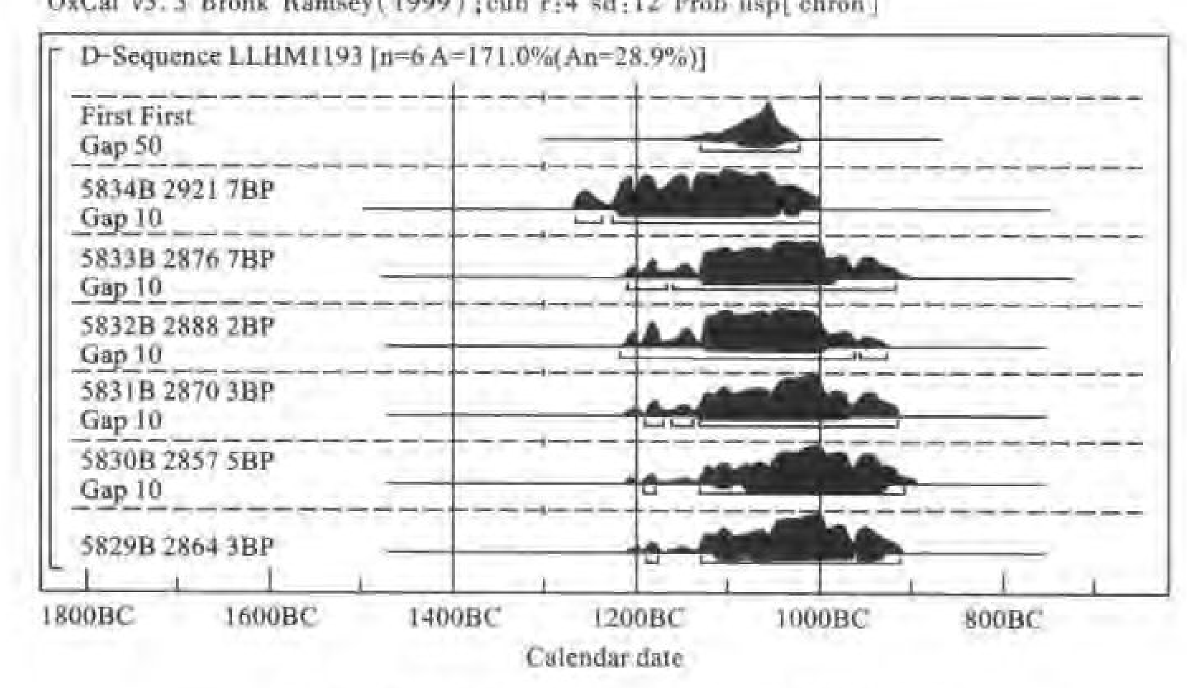


图 9.6　琉璃河 M1193 椁木树轮单一样品转换结果

采自张雪莲等：《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》，《考古学报》2003 年第 1 期。

琉璃河墓葬骨头的样品拟合结果是墓葬一期一段为公元前 1039—公元前 1007 年，三期晚段处于公元前 800～前 560 年，与考古研究所获得的该遗址年代从成王初到西周末的结论相符。琉璃河遗址年代的定出对夏商周年代框架的建立起了极为重要的作用，为西周历史及西周年代学研究提供了直接依据。

Atmospheric data from Stuiver et al. Radiocarbon 40 1041 - 1083(1998);

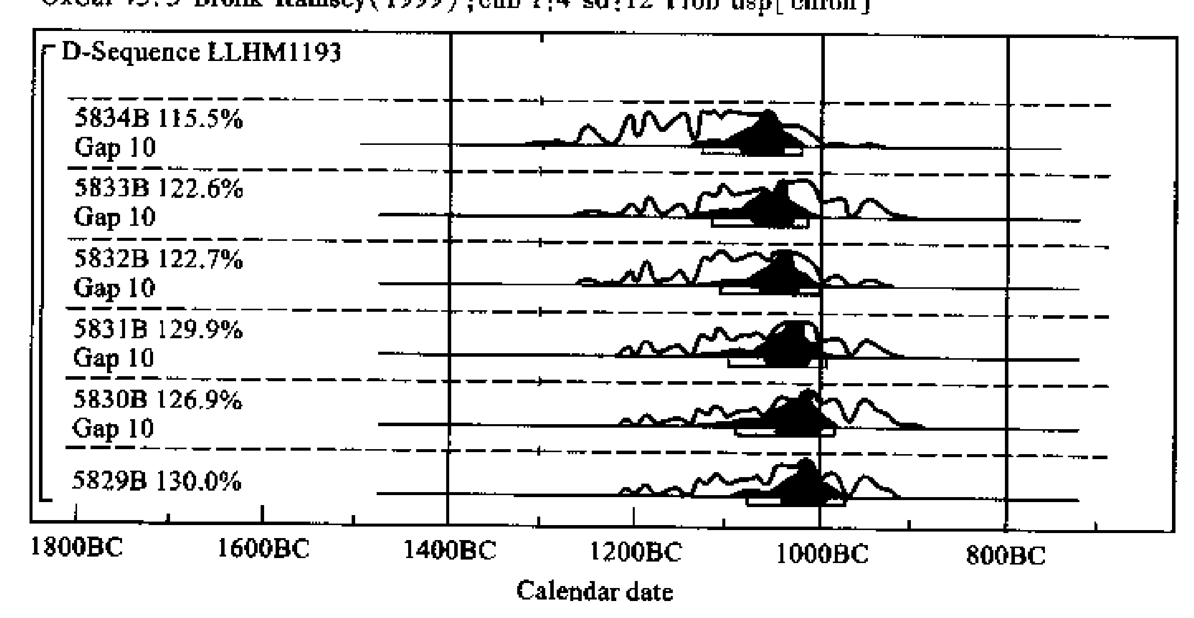


图 9.7　琉璃河 M1193 椁木树轮样品系列转换结果

采自张雪莲等:《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》,《考古学报》2003 年第 1 期。

表 9.3　琉璃河遗址 M1193 椁木树轮木质的 ^{14}C 测定结果

实验室编号	树轮轮数(由外到内)	苯量(克)	^{14}C 年代数据(5568,1950)
ZK - 5834B	第 47～56 轮	4.761 2	2 921 ±37
ZK - 5833B	第 37～46 轮	4.718 2	2 870 ±37
ZK - 5832B	第 27～36 轮	6.958 5	2 888 ±32
ZK - 5831B	第 17～26 轮	6.610 7	2 870 ±33
ZK - 5830B	第 7～16 轮	5.682 3	2 857 ±35
ZK - 5829B	第 1～6 轮	6.425 9	2 864 ±33

采自张雪莲等:《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》,《考古学报》2003 年第 1 期。

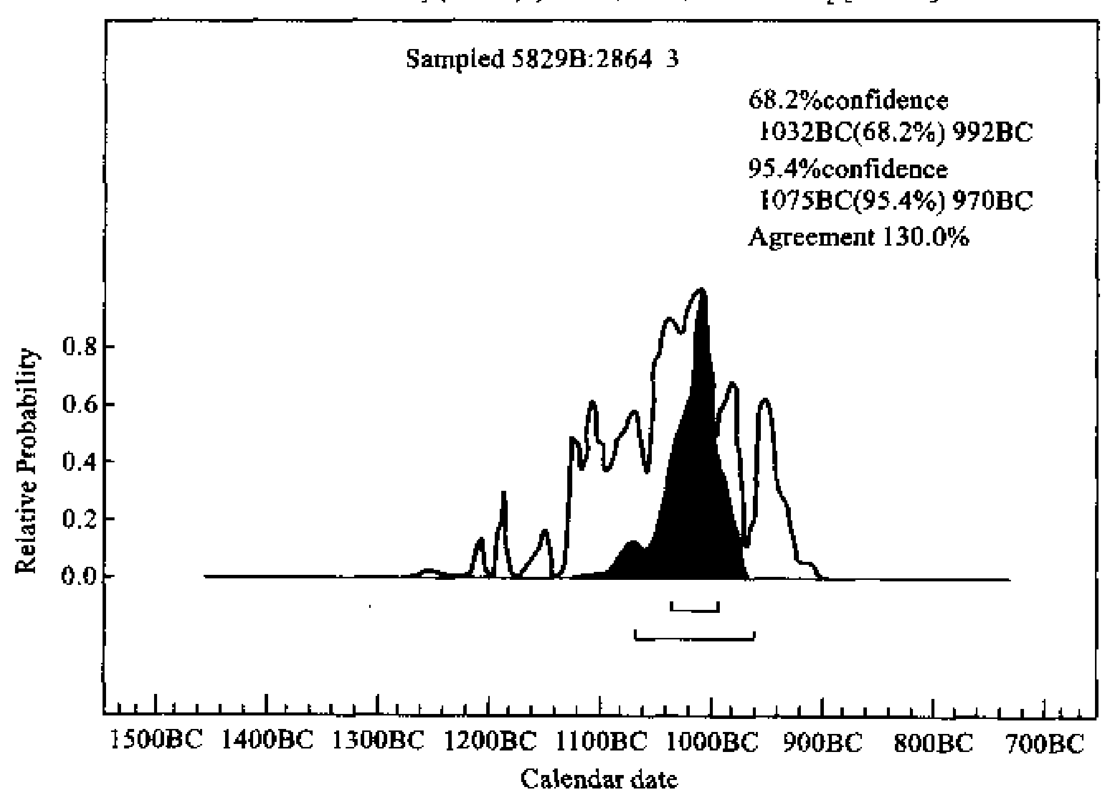


图 9.8 琉璃河 M1193—ZK5829 样品系列校正结果

采自张雪莲等:《琉璃河西周墓葬的高精度年代测定》,《考古学报》2003 年第 1 期。

第三节 释光断代

早在 1565 年,已经有人观察到释光现象。1852 年,G. G. Stokes 发表了一篇关于释光的文章。释光(Luminescence)是一个专门用于描述促进能量吸收并紧接着释放较低能量的释放现象。经过若干年的研究,科学家对释光的认识越来越多,根据输入能量的类型,可以分为许多释光类型,用于考古测年的是热释光技术和光释光技术。

一、热释光断代[①]

热释光(Thermoluminescence,TL)是一种物理现象。它是晶体受到辐射作用后积蓄起来的能量在加热过程中重新以光的形式释放出来的结果。早在1663年,英国的化学家Robert Boyle和Elsholtz就描述了热释光现象[②],之后陆续有人报道,大家称其为“磷光”。1898年,Trowbridge和Burbank通过实验,基本弄清了热释光的产生过程[③]。1953年美国威斯康星大学的Daniels等人提出用之来测定地质和考古年代的设想,1960年瑞士伯尔尼大学的GrÖgler,Houtermans和Stauffter第一次探测了古陶器发射的热释光[④],1964年爱特金(M. J. Aitken)成功地测定了古陶器的年龄,宣告了该方法的成熟。60年代以后国内外都对热释光现象进行了系统的研究,可以说热释光测年是20世纪60年代兴起并迅速发展的一项考古、地质测年技术。它可以确定考古遗物的年代,又可对古代文物尤其是古陶器的真伪进行鉴别。

(一)热释光断代的原理与方法

一些矿物(如石英和长石)受到电离辐射(如α、β粒子或γ、X射线)照射后,会产生自由电子,这些电子常被晶格缺陷俘获而积聚起来。在石英、长石晶粒被加热到临界点(300~450℃)时,这些被俘获的电子会从晶格缺陷中逃逸出来,并以发光的形式释放能量,即热释光,而石英等晶体就成为磷光体。

陶器的原料中一般都含有微量的U、Th系列核素和^{40}K等放射性物质,以及适量的磷光物质石英、长石、云母等晶体。放射性杂质会发射出α、β射线并轰击陶土中的石英结晶,使其电子无规则地游离到陶土的晶格结构中。当陶土被加热到

① 本段主要参考王维达主编:《中国热释光与电子自旋共振测定年代研究》,中国计量出版社1997年版。

② Boyle R. Experiments and Considerations Upon Colours With Obsenations On Adiamonal That Shines In The Dark,Henry Herringham,London 1664;Elshotz J S. De Phosphoris Quatuor Observations,Berlin:Schultz,1676.

③ Trowbridge J, Burbank J E. Phosphorescence Produced Lay Electrification, American Journal of Science, 1898,4(5):55;Philosophical Magazine,1898,5(45):100.

④ Daniels F, Boyd C A, Saunders D F. Ther Moluminescence As a Research Tool, Science, 1953(117):343;GrÖgler N, Houtemans F G, Stauffer H. Ueber Die Dalierung Vonkeramik and Ziegel Clurch Thermolumi-nezenz,Hevetica Physica Acta,1960(33):595.

380℃以上时（陶器在烧制过程中，一般要经过500～1000℃左右的高温），那些游离出来的石英结晶电子会重归原位并发光（即释放原来贮藏的热释光）。

热释光不同于一般加热后的炽热发光，它是放射性能量储存的标志。释放完后，陶器晶体继续接受、储藏大小恒定的固定辐射能，这些辐射能是陶器烧成后开始增加的，可以作为陶器年龄的标志。换句话说，热释光测定的是样品最近一次受热事件以来所经历的时间。这个辐射能为陶器总的吸收剂量或累积剂量，统称“古剂量”。然而，每件陶器的内部放射性物质含量和外部提供的辐射剂量不一样，况且一旦陶器埋藏在地下，周围土壤放射性杂质也会对陶器有作用，所以需要测定器物各自的年剂量，即每年提供给陶器中磷光体的辐射吸收剂量，它由陶器内部放射性物质提供的α、β剂量，陶器埋藏土壤提供的γ剂量和宇宙空间提供的宇宙射线年剂量四部分组成。年代越久，放射性越强，贮存的能量也就越多，热释光量也就越多，即热释光量与所受的放射性总剂量成正比。此外，陶器中的铀、钍、钾的寿命很长，陶器中的放射性强度几乎不变，因而热释光总年剂量与陶器烧制后产生的时间成正比，一件陶器样品加热时发射的热释光越强，其年代越长，反之则短。

各个陶器即使所受放射性剂量相同，所产生的热释光量也不一定相同；但对于同一陶器而言，热释光量与所受剂量一般成正比。所以，用人工辐照后，再测出热释光量就可推知该陶片对放射性辐照的灵敏度，用公式表示为

$$\frac{\text{人工剂量}}{\text{人工热释光量}}=\frac{\text{自然剂量}}{\text{自然热释光量}}$$

又由于

$$\text{自然剂量}=\text{自然年剂量}\times\text{年代}$$

$$\text{热释光灵敏度}=\text{人工热释光量}/\text{人工剂量}$$

所以

$$\text{陶器烧制的年代}=\frac{\text{自然热释光}}{\text{自然年剂量}}\times\frac{\text{人工剂量}}{\text{人工热释光量}}=\frac{\text{自然热释光量}}{\text{自然年剂量}\times\text{热释光灵敏度}}$$

在上式中，自然热释光量、人工热释光量都可以测定，人工剂量是已知的，只要测出自然年剂量，就可以算出陶器烧制的年代。

由热释光断代的原理可知，主要可以测出自然年剂量（陶片每年所受放射性辐照剂量）、单位辐照剂量的TL值（陶片对辐照剂量的TL灵敏度）、自然热释光量（陶片累积过程中）等因素。目前针对此三种值，主要有下列几种热释光断代

方法：

（1）利用细颗粒测定年代。在悬浮液中，将样品碎片夹碎，选取陶片中1～8微米大小的石英晶粒，悬浮使之分离，将悬浮的颗粒沉积送到仪器去测量自然累积剂量。再将标本用α或β源辐照一定已知剂量，测出TL灵敏度。再测出年剂量就可测定陶器年代。这种方法所需样品量少，适合测定年剂量。

（2）利用粗颗粒夹杂物测定年代。一般地，选取陶片中直径100微米左右的石英颗粒测其自然累积剂量，其辐照剂量主要考虑β、γ射线的作用。把退过火的标本经人工放射源辐照一定剂量，并放置若干天使低温发光衰退后在同样条件下测人工热释光量，便可得出陶片对辐照剂量的热释光灵敏度。再由灵敏度算出累积的自然剂量，除以测定的放射性年剂量即可计算出陶器的烧制年代。

（3）前剂量法测定年代。石英颗粒经放射性辐照后再加热到500℃可以引起石英晶粒110℃峰的热释光灵敏度增长，其增高量在一定范围内与辐照剂量成比例。但放射性辐照、加热二者缺一不可，满足其中单独一个条件都不会引起灵敏度的变化。通常石英晶体这一发光峰的灵敏度较大，热释光量也较大，但容易衰退。这就是前剂量理论。陶片未经500℃加热前给一试验剂量，测出其110℃峰的灵敏度，即是陶器烧成时的灵敏度S_0。经过500℃加热后给一试验剂量测出110℃峰的灵敏度，即是自然剂量辐照后的灵敏度$S_{自然}$。再给一定人工剂量辐照后再加热到500℃，冷却后给一试验剂量测出灵敏度，即为自然累积剂量加人工辐照剂量辐照后的灵敏度$S_{自然+人工}$。所以有

$$\frac{S_{自然+人工}-S_{自然}}{S_{自然}-S_0}=\frac{人工剂量}{自然累积剂量}$$

只要灵敏度的增加量与剂量保持线性关系，代人年代公式计算便可得出TL年代。

（4）用热释光元件测定陶器的年代①。用一个灵敏度比陶器高K倍的热释光元件嵌入陶器内部，与陶器一起接受内外射线辐照，以它作为陶器的受照代表（即它所接受的辐照与陶器的完全一样），受照一定时间后，取出元件测出其该段时间的热释光，并把它换算成年热释光，则此年热释光的K分之一就为陶器的年热释

① 王维达、周智新：《用热释光元件测定陶器的年热释光量——热释光断代技术的新进展》，《考古》1983年第7期。

光，即 TL 年陶器 = TL 年元件/K。

此外，还有其他的热释光测定方法，如相减技术、锆石或长石技术、薄片技术等①。

（二）热释光测定年代实际操作

1. 采集样品

为了确保样品的合适，目前都使用一台热释光剂量仪来测定剂量。在具体测量前将剂量仪放在所取样品的位置上，在送实验以前应先放置几个月到一年，以便测出一年的平均辐射剂量。如果没有那样的条件也可用闪烁计数器测定，几分钟即可完成。

前已述及，热释光测定年代的样品对象为陶器。取样时要分地层取样，每一文化层取 6～12 块陶片，而且样品要去掉外层部分。一般来讲，样品越大越好，最好在器物的不同部分都取一点，样品至少要在地下 30 厘米以下的深处提取。每片陶片重量约 10 克，厚 5 毫米以上，规格为 25 毫米 ×25 毫米左右。除了取陶器样品外，还得对其周围的土壤取样。土壤取样一般限于样品所处的 30 厘米范围内，分类取样并附详细的地形图和照片加以说明。一般地，每类土壤一小把即可。值得注意的是样品要标明出土地点、坑位和深度。

为确保样品中所储存的热释光不受影响，在取样的几分钟内要迅速将陶片、土壤样品用不透明的橡皮袋或塑料袋分装，以保持其中的水分，尽快送往实验室。同时要保证样品不受高温、各种光线的辐射。

2. 测定年代

在测定对象取来之后，要磨成粉末，分离出石英成分，再放到密封的石墨盘上加热测量。

专门的热释光测定年代装置（图 9.9）由加热系统、光测量和微型计算机几部分组成。将粉末状样品直接或间接放在电热板上，一旦加热，热电偶（测量加热温度的仪器）将加热的信号输入 $x-y$ 记录仪的 x 轴，这样，热释光对温度的坐标图就可以在加热过程中直接测得。热电偶的信号同时输入伺服控制系统，以便伺服系统控制通过加热板的变压器电流。光的测量由探测、转换和记录三部分组成。当

① 仇士华、蔡莲珍：《陶器的热释光测定年代介绍》，《考古》1978 年第 5 期；李士、秦广雍：《现代实验技术在考古中的应用》，科学出版社 1991 年版，第 32 页。

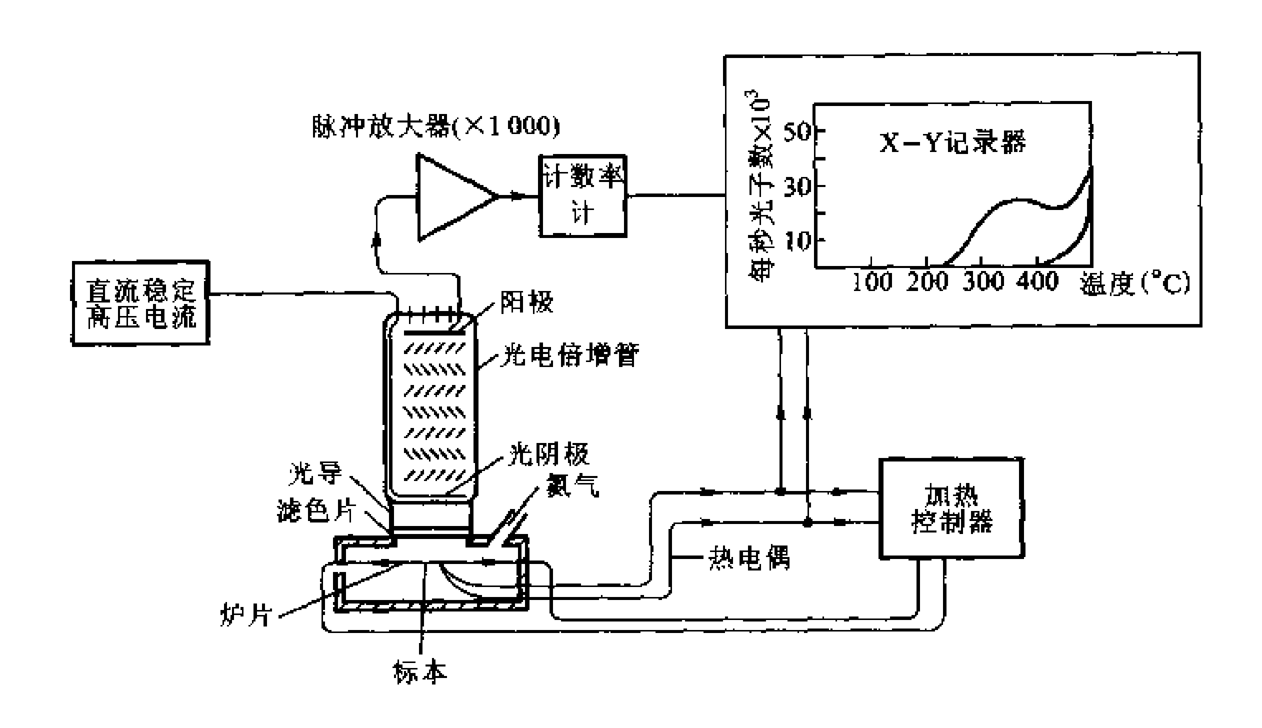


图 9.9 热释光仪器装备图

采自仇士华、蔡莲珍:《陶器的热释光测定年代介绍》,《考古》1978 年第 5 期。

光打到阴极时,光电材料将光子转换成电子,每一个从光阴极发射的电子到达阳极时已变成几百万个电子,这样在阳极产生一个连续的电子脉冲。阳极输出的信号通过脉冲放大器和甄别器把选择出来的脉冲输入光子率表。率表将信号分成两种,一路转换成电压接入 $x-y$ 记录仪,另一种信号进入峰值积分仪,将需要的光子信号转换成数字信号,输入微机系统,微机系统由同步显示和数据处理两部分软件完成。

热释光年代表示为:年[± 误差(P) ± 误差(α)],P 为实验误差,α 为可解误差。

(三) 热释光测定年代应用

热释光测年法的适用范围广,可从 5 000 年到 50 000 年甚至 50 万年不等,可测从旧石器时代的火烧土、最原始的陶器直到近百年的瓷器。测定对象除了陶器、火烧土外,也可对燧石、黄土、方解石进行测定。

热释光测年法尤其对原始文化的年代确定意义重大,特别是没有 ^{14}C 标本或 ^{14}C 标本可疑的遗址,因为陶器作为测试对象不会因发掘时打破层位或乱层现象发

生麻烦。

利用热释光测年成功的例子已不少,如对河姆渡文化遗址年代的测定,^{14}C 测定为 6 955 ±130 年,热释光测为 6 220,比前者要精确得多。

热释光还在文物的真伪鉴别方面有很大的优势。如社会上伪造、仿造有很多的青铜器、陶瓷器等文物,依传统的鉴定方法,通常是对其外观、艺术风格、纹饰以及铭文进行观察和辨别;但相当多的赝品已可以假乱真,这就需要借助现代科技手段作鉴定。如果能够确知某件器物的年代,则对其真伪的鉴别解决了一个关键性的因素,因为伪造品距今一般不过百年左右,而真品通常在几百年以上,对其年代的测定,热释光是较容易做到的。在这方面,已有学者做了很好的研究和尝试。

1970 年,Fleming 等对我国六朝时 9 件陶俑用钻孔或碎片取样制备成细颗粒标本,进行测定。开始采用平均年剂量 0.48 拉德/年粗略估算出陶俑的年代,其中 3 件属于古代制品,其余 6 件为 300 年内制品。后来又仔细测定了实际接受的年剂量,包括铀、钍的有效 α、β 剂量,钾的 β 剂量和环境剂量,得出各件陶俑的年剂量值从 0.386 拉德到 0.775 拉德,为平均年剂量的 0.8 到 1.6 倍。3 件古代制品的年代在距今 4 050—1 280 年前,其余 6 件在 320—40 年前。1972 年,Fleming 等还对河南辉县的一批器物进行测定。这批东西在 20 世纪四五十年代被欧洲人认为是战国时期辉县的典型器物,也有人认为是伪造的。经热释光测定发现来自英国的 15 件、美国的 5 件、北京的 2 件全是伪造的①。

热释光测年法以标本用量少、速度快(几小时)、跨度大而备受欢迎。但同时,我们要认识到热释光的精确度,对古剂量、年剂量影响的各种因素(灵敏度、非线性、饱和等),那么就不但需要精确确定天然放射性来源,而且应考虑陶器在历史上实际接受放射性照射条件(如含水量、氡逃逸等影响)。只有对上述各种因素作了正确测定和较正后,才有可能使其精确到 10%②。而实际上由于多方面因素的影响,这些因素都不可能做到精确。同时做热释光时,方法误差、实验误差和测量误差也不可避免。牛津大学埃特金认为,在最理想的条件下,热释光测年法能达到 5% 的相对误差,这样对于 2 000 年以内的样品,其绝对误差可小于 100 年,有可能比 ^{14}C 法精确;但在 2 000—8 000 年范围内,^{14}C 法要更为精确。当大于 8 000 年

① 引自仇士华、蔡莲珍:《陶器的热释光测定年代介绍》,《考古》1978 年第 5 期。

② 崔晓林:《热释光测定年代》,《中国文物报》1994 年 4 月 10 日第 2 版。

时，^{14}C 没有年轮校正曲线，热释光法可与^{14}C 法相互补充即证①。

二、光释光测年

在热释光基础上发展而来的光释光（Optical Stimulated Luminescence，OSL）技术，自一出现就备受关注。1985 年 Huntleyetal 首先提出了光释光法，1988 年 Huntleyetal 又提出了红外光释光测年法（Infra-red Stimulated Luminescence，IRSL）。到 90 年代，光释光技术得到很大发展，适合于各类沉积物年龄（如黄土地层和考古堆积地层的年代）的测定，其测年结果可与^{14}C 测年相媲美，其测年范围从近百年到几十万年。目前已广泛应用于第四纪沉积物的年龄测定，对有些年龄超过 4 万年或不含有机碳物质的样品，它更是一种不可替代的测年方法。对测年对象，只要样品中的石英或长石矿物颗粒在埋藏前见过光或加过热，就可以对这一见光或加热事件进行光释光测年。

光释光技术的原理与热释光近似，也是利用矿物晶体的磷光现象。由于晶体受辐射损伤后产生的陷阱电子保存在晶格中，在光的作用下，这些陷阱电子被激发跃出陷阱与空穴复合，同时以光子发射的形式释放其能量。存在于晶体中的陷阱电子，对于光的反应却不相同。一部分是对光敏感的陷阱电于，它们在光的作用下跃出陷阱与空穴复合，随即放出光子，这类陷阱电子称为“光敏陷阱电子”。光释光所测定的正是这些陷阱电子。与热释光技术通过加热的手段不同，光释光是通过外加的光照来激发陷阱中的电子，使其退激发光。

结晶矿物的释光信号强度与该矿物沉积后接受环境辐射所经历的时间密切相关。在一定条件下，矿物接受辐射的时间越长，其释光信号就越强。因此，可以通过测定石英、长石等矿物所吸收的电离辐射剂量，用公式表示为：$t = Deq/D$，式中 t 为矿物在曝光后被埋藏至今的年龄，Deq 为等效剂量，是被测样品产生天然积存 OSL 所吸收的辐射总剂量，可通过矿物释光强度及其对核辐射剂量响应程度的实验测量来确定；D 为剂量率，是被测矿物单位时间内吸收周围环境中^{238}U、^{232}Th 及其衰变子体和^{40}K 产生的 α、β 和 γ 辐射剂量，以及宇宙射线提供的少量辐射剂量。

我们知道，黄土和地层的堆积物含有石英、长石等矿物颗粒，它们在沉积前的

① 陈铁梅：《应用于考古学中的年代测定方法综评》，《考古与文物》1980 年第 3 期。

搬运过程中往往受到阳光的照射而使其原先积累的能量被晒退，称为光晒置零。沉积以后这些矿物颗粒又开始积累能量。光晒只能使矿物的"光敏陷阱"中的电子退激，而另一部分对光不灵敏的电子陷阱中的电子仍保存在那里。热释光测年与两种电子陷阱均有关，所以热释光对黄土和考古地层的测年往往偏老；而光释光测年所涉及的只是光灵敏陷阱中的电子，相对精确些。

与热释光测年相比，光释光测年可以不考虑残留的光释光信号，而且测量具有简便、迅速且准确等优点。光释光信号还具有矿物分选性，当石英被红外线束照射时，几乎不产生光释光信号，而长石却对红外线束很敏感。据此，光释光测年技术可分为绿光释光（Green Light Stimulated Luminescence，GLSL；用绿光光束作为激发光源，被测矿物主要为石英）和红外释光（Infrared Stimulated Luminescence，IRSL；用红外线作为激发光源，被测矿物主要为钾长石）测年技术。

Rees Jones 等用光释光法测定了英国 9 个考古地层的年龄，其跨度从距今 18 万年至 1000 年，除 3 个地层因沉积物在沉积前阳光晒退不充分外，其他地层所测年龄与已知年龄基本一致①。

张家富等用光释光测年技术对河南偃师商城宫城建筑基址的夯土进行了光释光测年②。偃师商城遗址是 20 世纪 80 年代我国考古界的一项重大发现，其始建年代被认为是夏商王朝分界的标志③。尽管已经用 ^{14}C 测年等方法对其进行了大量的研究，但学术界对偃师商城的年代包括夯土城墙的始建年代仍存在不同看法。在以往发表的测年数据中缺少直接用于判定城墙建筑年代的数据，故城的年代更多的是依据相关遗迹的年代来间接推断。用光释光测年将推进对其性质的认识。

夯土是被夯打处理过的土，其包含物中有些颗粒在从取土、运输到夯实的过程中有很多机会曝露在日光下，它们原有的光释光信号被完全或部分抹去而回到零点。在夯实后，这些颗粒吸收环境中的放射性能量而使其光释光信号重新开始积累。如果能够测量出这些颗粒的等效剂量，就能对其进行定年，从而得出夯土基址的建造年代。实验中，他们选择偃师商城宫城内地点相近、建筑基址结构完整、建

① 陈铁梅：《九十年代科技考古的发展》，《中国考古学年鉴》，文物出版社 2000 年版。

② 张家富：《偃师商城宫城建筑基址夯土的光释光测年初步研究》，《核技术》2003 年第 26 卷第 1 期。

③ 夏商周断代工程专家组：《夏商周断代工程 1996—2000 年阶段成果报告》（简本），世界图书出版公司 2000 年版，第 84 页；高炜等：《偃师商城与夏商文化分界》，《考古》1998 年第 10 期。

筑次序明确的早、中、晚三期，即分别始建于偃师商城商文化第一期、第二期和第三期的建筑基址夯土为测定对象。测量时，他们采用单片再生剂量法测量了夯土中粗颗粒石英的等效剂量，测得的等效剂量值的分布说明石英颗粒的光释光信号在基址建造过程中有不同程度的晒退。据晒退相对彻底的石英颗粒得出的夯土光释光年龄分别是4.0千年、2.2千年和2.5千年。尽管这些年龄值与考古年龄存在差异，但表明用光释光测年技术对宫殿建筑基址夯土进行定年是可行的。

应用光释光技术对偃师商城宫城建筑基址夯土的初步测年工作表明，完全可以用光释光测年技术准确地对这类夯土进行定年。为了提高这类考古样品测年的准确性，需要对遗址进行系统取样测年，包括一些烧烤过的土块，尤其要搞清各样品之间在物质和时空上的关系，各相关样品的光释光年龄相互验证评价，这样，应用光释光测年技术就可以获得这类考古样品比较理想的年龄结果。

最近，梁宝鎏等人用蓝光释光（BLSL）测定了唐代、南宋、元代、明（嘉靖）、清（乾隆）5只古代瓷器样品的年代，结果与已知瓷样的年代结果吻合得很好（表9.4）。本方法的优点是只要用一个瓷薄片就能测出瓷器的年代，不用作瓷器的热激活温度测定，其年代测定的范围大大超过热释光法测定瓷器的年限。①

表9.4　5只瓷样的BLSL测年结果和已知年代统计表

样品号 Sample No.	类型 Type	β等效剂量 ED/mGy	年剂量 $D/mGy \cdot a^{-1}$	BLSL年龄 Age/a	已知年代(AD) Known Date/Dynasty
cc23－1	吉州窑 jizhou	3 847	4.9	785	南宋 Nansong (1127—1279)
cc23－2	吉州窑 jizhou	2 886	4.9	590	
cc23－3	吉州窑 jizhou	2 425	4.9	495	
cc23－4	吉州窑 jizhou	3 758	4.9	767	
cc23－5	吉州窑 jizhou	3 847	4.9	785	
cc37－1	景德镇 jingdezhen	1 413	4.84	292	清 Qing(乾隆) (1736—1795)

① 梁宝鎏等：《蓝光释光测定瓷器年代的初步研究》，《核技术》2003年第26卷第1期。

续表

样品号 Sample No.	类型 Type	β等效剂量 ED/mGy	年剂量 D/mGy·a^{-1}	BLSL年龄 Age/a	已知年代(AD) Known Date/Dynasty
cc37－2	景德镇 jingdezhen	1 718	4.84	355	
cc49－1	婺州窑 wuzhou	5 645	4.9	1 152	唐 Tang(619—907)
cc49－2	婺州窑 wuzhou	4 807	4.9	981	
cc49－3	婺州窑 wuzhou	5 002	4.9	1 020	
cc82－1	灰釉瓷 huiyou	4 474	6.04	740	元 Yuan(1271—1370)
cc82－2	灰釉瓷 huiyou	3 800	6.04	629	
cc82－3	灰釉瓷 huiyou	4 838	6.04	804	
cc1 05－1	景德镇 jingdezhen	1 254	4.94	254	明 Ming(嘉靖) (1522—1566)
cc1 05－2	景德镇 jingdezhen	818	4.94	166	
cc1 05－3	景德镇 jingdezhen	3 312	4.94	670	
cc1 05－4	景德镇 jingdezhen	2 798	4.94	566	

采自梁宝鎏等:《蓝光释光测定瓷器年代的初步研究》,《核技术》2003年第26卷第1期。

光释光测年可以成功地测出风积物的年代,但对于水积物却不甚清楚,因为水积物在水的搬运过程中所受的光照不能保证充分地晒退。

第四节 其他测年法

除前述几种常用断代法外,还有其他一些断代方法。但目前或因其测年范围的限制,或是受测定样品所限,一般都是在^{14}C、热释光、树轮纪年法等无法测得或需要参考的情况下才考虑使用,而且使用时最好参照其他方法。

一、古地磁学测年法

古地磁断代,包括考古地磁断代(Archaeomagnetic Dating)和地层沉积磁性断代(Paleomagnetic Dating)两种方法。前者是利用某些古物的热剩磁性进行断代,

主要用于陶窑、烧炉、灶、砖瓦、陶瓷器的年代测定；后者利用地层沉积磁性随地磁极性倒转而倒转的现象测年，多用于旧石器时代古人类遗址的断代。

（一）考古地磁断代

利用磁学的方法进行考古断代是20世纪后半期新兴的技术和方法，后形成了考古磁学(Archaeomagnetism)这一学科。考古磁学主要用于研究古代遗址和古代文物的年代。此外还可以分析古陶制造原料的来源、陶器烧结温度，甚至对古代环境的研究提供资料。

陶器、壁炉、窑土等遗存在制作时或使用中会含有少量的磁性矿物（如赤铁、磁铁），经高温烧结，陶坯中原有的磁性会全部消失，然后在地磁场中缓慢冷却下来时，陶器中的磁性物质又会重新获得一种与当地地磁方向（磁偏角、磁倾角）一致的永久磁性。这种现象叫热剩磁（TRM）。热剩磁的磁化强度与地球磁场强度成正比，它忠实地记录了当时当地的地磁场。所以，只要知道地球磁场的强度、方向的变化规律，通过测量热剩磁与磁性变化曲线，就可比较得出陶器的年代。但是，地球磁场因时空不同而异，要想确定某处的地磁变化规律就需数百年甚至数千年的长期数据，因而想确定当时的地磁强度和方向就十分困难。

考古学中一般利用已知年代样品的热剩磁方向和强度的数据，去画出过去的地磁方向和强度变化规律曲线。通过测定未知年代的样品的剩磁所记录的烧制时的地磁参数，可以用内插法推定样品的年代①。但是地球磁场因时空不同而异，不同地区应该确定不同的磁场年代曲线作为对比母线。一般地，一条校准曲线适用范围是数百公里。所以，严格地说，考古磁学断代是一门比较测年方法②。

考古磁学断代包括地磁方向断代和地磁强度断代两种具体方法。前者必须选用适当的样品（要求量大，而且样品在遗址内未经移动过、保持原始的状态）和该地区的校准曲线。后者不注重样品位置的改变，但在操作过程中必须对样品进行磁屏蔽。

考古地磁年代测定法十分有用，它已解决了许多问题，如测定古窑、古灶、古砖的最后一次加热年代；并且能提供考古样品的磁场方向和强度变化的信息。但因为它本身的实验曲线是建立在“已知年代”的基础上，是一种相对测年法，因而误差较大。

---

① 陈铁梅：《应用于考古学中的年代测定方法综评》，《考古与文物》1980年第3期。

② 陈铁梅：《我国旧石器考古年代学的进展与综评》，《考古与文物》1988年第3期。

(二) 地层沉积磁性断代

在地球的演化过程中，地球磁场是不断变化的，有时会发展到磁性倒转。岩石中含有磁性矿物，其在成岩过程中受到地磁场作用而被磁化产生剩余磁性，这种剩余磁性反映了岩石生成时期的地磁场方向。海相沉积层和深海沉积层中含有磁性矿物颗粒，在沉积过程中取地磁方向显示沉积磁性，反映出沉积时期的地磁方向。

实践表明，只要从不同深度的岩层中取样，便可获得一个连续的磁极变化序列（地层剖面的地磁极性变化柱），再结合地球磁场发生倒转的岩层位置并在钾－氩法的帮助下测出该地磁极性变化柱的大致年代，然后将此地磁极性变化柱与已知的国际地磁年表比照，来确定地层剖面的地质时间区段及其考古遗存所处的时间位置。

我国学者用考古磁学断代法确定湖北"郧县人"化石地层的年代①。古地磁采样剖面位于探方北侧约 50 米处，剖面总厚度为 17.5 米，其岩性共分 14 层，主要为黏土、砂质黏土、砂土、砾石层等。两个古人类化石分别位于第 3 层（沙质黏土）的顶部、底部。在地层剖面内共分布有 39 个采点，在 2、3、4 层采点间距为 20 厘米，第 6 层至基岩间的采点间距为 50 厘米，砾石层未采样。将采好的土样装于直径 2.5 厘米 ×2.2 厘米的无磁塑料盒内，密封，使其保存原始自然状态。样品经交变退磁处理后用 DSM－2 型旋转磁力仪测试。

将测试的化石地层剖面的地磁极性柱与 1989 年编制的国际地磁年表间的对比可知，该地层剖面所形成的时代大约在距今 1.7 百万年—0.7 百万年前，第 2 层岩性上部的 B/M（布容正向极性带/松山反性极性带）极性分界处（约 1 米深处）是 0.73 百万年前。第 6 层至第 4 层间出现的 Jaramillo 正向极性亚带的起止时间为 0.97 百万年—0.9 百万年前，其下界对应的深度在 8.2 米处。第 8 岩性层出现的 Cobb Mountain 正向极性亚带所代表的时间为 1.12 百万年前，时间跨度为 0.01 百万年左右，其剖面对应深度约为 10.4 米。最下部第 10 层出现的 Olduvai 正向极性亚带，相应的剖面位置为 13.3 米左右，它开始的时间为 1.67 百万年前。由此可见，该地质剖面所处的地质时代应是早更新世和中更新世的早期；明显可见含动物化石的第 3、第 4 岩性层处于 Jaramillo 正向极性亚带的顶部至 B/M 分界带之间。

① 阎桂林：《湖北"郧县人"化石地层的磁性地层学初步研究》，《地球化学——中国地质大学学报》1993 年第 18 卷第 2 期，第 221—226 页。

所以,"郧县人"生活的地质时代大约为距今0.9百万年—0.8百万年前。

二、铀系同位素断代法

铀系同位素断代(Uranium - series Dating),又称不平衡铀系断代法,是利用样品中铀系、钍系子体放射性的不平衡性测定年代技术的总称。

在自然界中,广泛存在长寿命放射性同位素铀-238(^{238}U)、铀-235(^{235}U)、钍-232(^{232}Th),各自经过一系列衰变,最后分别变成稳定同位素铅-206(^{206}Pb)、铅-207(^{207}Pb)、铅-208(^{208}Pb)。在封闭体系内,经过足够长的时间(与寿命最长的子体的半衰期相比),各个子体的放射性强度都会达到与母体的放射性强度相当,母体与子体之间的放射性水平处于平衡状态。但是,由于物理或化学运动,母体与子体间会发生迁移、相互分离的现象,在新构成的系统中,在未达到新的平衡之前,处于一种不平衡状态。在不平衡状态的新系统中,根据子体积累的程度,就可以确定新体系开始沉积的年代。如果在沉积物中伴出古代遗存,则同层沉积层的年代就代表古人类活动的年代。

铀系法所需样品仅几十克碳酸盐或几克动物牙齿、骨化石即可,但实际上理想的样品并不多,而且误差也较大,所以经常与钾-氩断代法、裂变径迹法、氨基酸外消旋法等断代方法互相补充。这种方法适合于旧石器时代古遗址的测年,所测年代在0.5万—50万年,而且仅限于测定富含碳酸钙的岩石。近年来,质谱铀系法得到了很大发展,其用样品量少、精度高等优点显著,且将最大可测年龄推前到距今五六十万年,代表了铀系测年技术的方向,中国科技大学已建立了我国第一台质谱测年铀系系统。需要注意的是,最近一系列碳酸盐的铀系测年结果,有把我国旧石器年代框架整个往前推的趋势①。1993年,McDermott等利用高精度、高灵敏度不平衡铀系热电离质谱定年(TIMS U - Th)法测定了以色列尼安德特人和早期现代人的牙质化石年龄,证明以色列Tabun的尼安德特人和Qafzeh的早期现代人基本上是同时代的,年龄为100±5Ka,这一结果解决了长期以来有关尼安德特人和早期现代人之间关系的争论②。

---

① 陈铁梅:《九十年代科技考古的发展》,《中国考古学年鉴》,文物出版社2000年版。

② 引自李献华:《不平衡铀系定年的新技术突破——高精度、高灵敏度$^{238}U-^{234}U-^{230}Th$同位素质谱测定和应用》,《地球科学进展》1994年第9卷第3期。

三、钾－氩断代法

钾－氩断代法(Potassium － argon Dating[K/Ar]),亦属于同位素断代法的一种,是利用矿物中钾－40衰变成氩－40的原理进行断代的。

在地壳中,有丰富的钾(2.8%)。钾的同位素有不稳定的同位素钾－40(^{40}K)、稳定的同位素钾－39(^{39}K)、钾－41(^{41}K),前者占0.0118%,后两者共占99.9%。^{40}K有两种不同的衰变方式,约有89%发射一个电子,衰变为钙－40,其余11%以捕获K一个电子的方式衰变成氩－40(^{40}Ar)。放射性成因钙－40与原来岩石中的钙－40无法加以区别,而衰变成的^{40}A比较容易测定。氩是惰性气体,在火山岩形成时,由于高温岩石中不可能保留气体,只有在岩石冷却成岩后放射性成因^{40}Ar才逐渐在岩石中积累,岩石中的^{40}Ar实际上就是岩石形成年代的放射性测年时钟。所以,只要测出岩石中的^{40}K和放射性成因^{40}Ar的含量,就可以定出岩石形成的年代。

因为^{40}K的半衰期长达13亿年,对于形成时间较短的岩石,其中含有的^{40}Ar含量较少,不易测准,误差较大,所以考古学中用钾－氩法测定旧石器时代的遗址年代。近年来,钾－氩法得到改进,精度有所提高;如目前采用的$^{40}Ar/^{39}Ar$法,将样品用中子照射,分别测定$^{40}Ar/^{39}Ar$值,再计算其年龄。

考古中多用钾－氩断代法来测古代骨头和岩石沉积物的年龄,如在对东非的早期人类遗存的测定中经常使用该法。

四、电子自旋共振测年法

电子自旋共振(Electron Spin Resonance,ESR),又叫电子顺磁共振(Electron Paramagnetie Resonance,EPR)。它是一种微波吸收光谱技术,用来检测和研究含有未成对电子的顺磁性物质。1975年池谷元伺(Ikeya)首先提出,用ESR来测定Akiyoshi洞穴中堆积物的年龄。目前,ESR在地质、生物、医学、考古学中都应用广泛。ESR除了测石英外,还可以测定珐琅、海生贝壳化石和火山物质等;测定的年限也扩展到晚更新世和全新世时期。

ESR是一种物理现象,它是电子自旋能级在外磁场的作用下发生塞曼分裂,同时在外加微波能量的激发下电子从低能级向高能级跃迁的共振现象。ESR测年法的基本原理就是直接测定样品自形成以来由子辐射损伤所产生的顺磁中心的数目

（即所接受的放射性射线辐照和本身的累积效应）。在 ESR 测年法中，被测样品实际是一个剂量计。用公式表示为 $P = AD = \int_0^A D(t)\,dt$，其中 P 为样品古剂量（自样品形成后累积的辐射年剂量），也就是累积剂量 AD，A 是样品年龄，D 是样品的年剂量（样品每年接受的天然辐射剂量率），D 随时间而变化，$D = D(t)$。

ESR 与其他测年法相比，其优点显而易见：

（1）测年范围广，从几千年到几百万年，几乎覆盖了整个第四纪地质年代，主要用于几十万年的范围。

（2）测定对象广泛，洞穴的碳酸盐沉积物、软体动物贝壳、珊瑚、古脊椎动物和古人类骨骼、牙齿等都可认为测试样品。

（3）测试条件简单，测试信号受周围环境影响小，而且样品可反复使用。

（4）是一种非破坏性的分析方法，对样品不存在损伤。

ESR 测年目前缺乏深入系统的研究，而且主要用于地质方面，还有许多需要完善的地方。它依赖于铀的加入模式，样品含铀量、α 辐照有效系数等一系列因素，尚需进一步研究。特别是对于接近或早于 100 万年的样品，样品埋藏期间 ESR 信号的衰退可能会导致 ESR 年龄偏低。陈铁梅等专家指出，对于老样品，在未作衰退校正前，早期铀加入 ESR 模式年龄只能看成是真实年龄的上限，ESR 和古地磁结合，有时可得出较可靠的年龄值；ESR 与铀系测年可互补互检①。

我国学者已用 ESR 法测定了金牛山、郧县、南京汤山、巫山、泥河湾等古人类与旧时期地点的年代，金牛山人的测年结果表明中国的早期智人时代并不比非洲和西亚的早期智人晚，有力地支持了现代人类进化的多地区连续假说。

黄培华等用 ESR 测年法对北京猿人年龄进行了测定②。所采集的样品还包括与北京猿人共生的动物牙齿化石，测年结果基本确定了周口店第一堆积层的开始、终止年代。

陈铁梅等用 ESR 方法测量了 5 个采自南京直立人地层化石牙珐琅样，其年龄

① 陈铁梅：《九十年代科技考古的发展》，《中国考古学年鉴》，文物出版社 2000 年版；陈琪、陈铁梅、李久强：《用牙珐琅电子自旋共振法测定早更新世古人类与石器地点年代的探索》，《核技术》1999 年第 22 卷第 10 期。

② Huang Pei - Hua. The Development Process of Peking - Man Cave and Global Climalic Changes Proceeding of the XI International Congress of spelogy. 1993,42.

的平均值为355±42千年。同时，还测了7个"小洞"样品的不平衡铀系年龄，其中3个是同时测ESR年龄的；基于铀早期加入模式的ESR测年的合理性为同地层牙化石样和方解石样的不平衡铀系测量所验证。综合两种方法对两类样品的测年结果，南京直立人地层的堆积年代可能在350±50千年范围，在时代上与晚期北京人相当，而早于离南京不远的和县直立人，从而为直立人种在我国地区的进化链上补充了一个重要环节。①

五、裂变径迹法断代

裂变径迹法断代(Fission - track Dating)是利用铀-238自发裂变径迹数进行断代的技术。

铀的重同位素^{238}U的大质量原子核在自发裂变过程中，向外放射大量的能量且高速向外发射出裂变碎片，这些碎片对周围的物质造成约10微米的柱状损伤，在透明矿物内留下像疤痕一样的裂径迹。在衰变速率不变的前提下，裂变径迹数随时间而增加。所以，只要根据样品中的铀含量和自发裂变的径迹数，就可求出样品经受最后一次高温事件的年代，用公式表示为：

$$最后高温事件年代\ t = 系数\ K \times U\ 含量 \times {}^{238}U\ 裂变径迹数$$

裂变径迹法断代依赖于合适的考古材料(如黑曜岩)或与考古学有关的热事件，所以考古工作常常在有古人类遗址的火山灰层或活动过的火堆旁取样，包括被高温烘烤过的矿物颗粒、陶器中的矿物颗粒、人工玻璃等都可作为样品。

由于裂变径迹法是基于许多假设之上的，如铀的衰变速率恒定、铀在材料中均匀分布、热事件之后的裂变径迹是可以观察到的。而这些假设常常同实际情况有差别，所以遭到质疑，在实际工作中应与钾-氩法互相校对以确定早期人类遗址的年代，考古上此法可能被热释光和电子自旋共振方法所取代。

六、黑曜岩水合法断代

黑曜岩水合法(Obsidian Hydration Dating)是利用黑曜岩表面水合层的厚度来推测黑曜岩工具制作年代的技术。

---

① 陈铁梅等:《南京直立人地层的ESR测年研究》,《核技术》1997年第20卷第12期。

黑曜岩是由熔融的硅酸盐浆暴露在空气中迅速冷凝形成的火山玻璃。石器时代的古人类常用它制作工具。黑曜岩对水具有极强的亲和力,可以通过扩散作用或吸附作用把水分吸纳到体内,形成水合层。黑曜岩工具在制作时,其表面水合层的厚度为零,由此开始水合作用,经历的时间越长,水合层的厚度越大,用公式表示为

$$D^2 = Kt$$

式中,D 为水合层的厚度;t 为经历的年代;K 为扩散系数(与埋藏的温度和黑曜岩本身的化学成分有关,而与湿度无关)。

由于埋藏环境的温度并非稳定不变,所以这种方法经常限于局部地区的相对年代的测定,最好与^{14}C 测年法、树轮年代法、埃及历等校对,与这些方法比较确定出标准后,再用内插法或外推法得出绝对年代。

七、氨基酸外消旋断代

氨基酸外消旋测年(Amino - acid Racemization Dating)是利用动物死亡氨基酸化学变化速度测定年代的技术。

动物或人类死亡后,体内原生的 L 型蛋白质氨基酸(左旋体结构)逐渐向 D 型蛋白质氨基酸(右旋体结构)转化,最后达到平衡,致使旋光作用消失,这个过程称为外消旋反应。可以用物理、化学、生物的方法将左、右旋结构的氨基酸分离处理进行测定,利用各种左旋结构氨基酸所具有的各自向右旋结构转变的半衰期以及氨基酸右、左旋结构体的比例(D:L),就可以推算出动物死亡的年代。影响外消旋反应的因素颇多,如物理、化学环境,主要是与温度环境有关。

氨基酸外消旋测年范围可从几百万年至几千年。因为洞穴和海底的温度变化较小,易于求得平均温度,所以氨基酸外消旋法适合测定古老洞穴遗址和海底沉积化石的年代。尽管用氨基酸外消旋法测年的准确度不是很高,但由于其样品易采且测定的年代可以补充其他测年方法在时段上的空白。

除了以上方法外,还有一些不太常用的方法,如根据某些化学成分发生变化的化学元素分析法(目前已应用的有氮元素含量的测量、铀和氟元素含量测量),主要适用于骨头样品。

考古断代方法很多,各有其适用范围和局限性,为了收到较好的效果,最好是多采样,多种方法并用,互相校正、参考,以获得更准确的年代。例如尹功明等人对

大荔人化石地层的年龄进行测定，他们根据黄土－古土壤的红外释光（IRSL）测年、大荔人化石层的贝壳化石 ESR 测年和哺乳动物牙齿化石的铀系测年等多种技术的综合结果，认为大荔人化石所在地层的年龄大约为距今 300—260 千年①。

思考题

1. ^{14}C 断代法的原理是什么？
2. 如何校正系列样品 ^{14}C 年代？
3. 怎样利用热释光来测定年代，其与 ^{14}C 断代法相比有何优缺点？
4. 在采集热释光测年样品时要注意的事项有哪些？
5. 简述考古磁学测年法在考古中的应用。
6. 什么是电子自旋共振？如何利用电子自旋共振来测定考古样品的年代？

① 尹功明等：《大荔人化石地层的年龄》，《科学通报》2002 年第 47 卷第 12 期。

第十章
文物形态结构与组成的研究

第一节　文物的形态分析

一、文物的形态分析手段

考古工作是通过研究文物来研究古代社会历史的，必须借助于文物才能认识古人。要研究文物这个古代社会的物质载体，必须先对它有外形上的认识。面对杂乱无章的各种器物，首先要对之进行分类，然后找出它们的联系与区别，这就需要类型学的分析。类型学的研究一般是从器物的外形入手，即所谓的形态分析。传统的考古学对器物类型的分析基本上靠器物外形上的一些特点，这些特点的区分主要是依靠眼力与简单的测量与统计，这种直观的类型学分析不可避免地带有较强的经验性、一定的主观性和片面性，尤其是当面对那些残缺不全或样品参数较多的文物时。

随着科学技术的发展，对事物的描述和分析要求越来越精确，数学方法和计算机技术为科学研究提供了强有力的支持。现在，数学已成为自然科学、社会科学的强有力的工具，电子计算机的普及及其迅速发展强烈地渗透并服务于各个学科，数学方法与计算机的应用使得科技考古趋于迅捷、精确、全面。“利用考古学内在的数学规律，将研究课题做数字化处理，借助计算机快速、高效可靠的特点，迅速求出

考古学家期望得到的结论，这将是考古学家研究工作中的强有力的工具和手段。"[①]在国外，已有这方面的论著，如《考古学中的数学和电子计算机》、《考古学中的数学》[②]。

(一) 数学方法的作用

现代科学技术发展的一个重要趋势是各门学科的数学化。数学是一门逻辑推理极强的学科，它处理各种量及其关系，而所有的量都是从现实中抽象出来的。所以，"数学是特别适合于处理任何种类的抽象概念的工具，在这个领域内，它的力量是没有限制的"[③]。数学概念及其理论的特征决定了数学方法具有高度的抽象性、精确性和逻辑性。"数学方法是定量地发现、论证和描述客观规律的方法"[④]，将数学方法引入考古学中给考古学带来了新的生机。

考古资料实际上也存在着质和量的关系，各种遗存以多种形式与周围其他遗存之间保持着数量的特征和联系。如长期以来人们重视的考古学文化及各个考古学文化之间的关系就是考古学文化的内涵和质量的变化。目前，世界各地的文化框架、谱系序列已基本完成；当对考古学文化的性质有了相当的研究后，单凭人们的经验和简单的比较、归纳就难以对考古遗迹、遗物及遗存间的相互关系这一复杂体系做出科学的研究，因此对其定量的研究就显得十分必要；而且考古学研究是根据考古材料中所含的信息"模式"(如一个考古学文化的内涵)和"关系"来推断古代情况的。定量是从数量的方面表示事物间的联系和相互作用[⑤]，定量研究可以从同一材料中取到更多、更精确、更严密的信息(如更多的模式及其内涵)，尤其可以减少人的随意性和主观性。国外的定量研究最初是新考古学派喜欢使用的，目前比较成熟，并有专著出版，甚至有人提出计量考古学。我国也开始注重这方面的研究。

① 仇士华、蔡莲珍：《现代自然科学技术与考古学》，《中国考古学论丛——中国社会科学院考古研究所建所40年纪念》，科学出版社1993年版。

② Doran F E, Hodson F R. Mathematics and Computers in Archaeology. Harvard University Press, Cambridge ,1975; Orlove B S. Mathematics is Archaeology. Cambridge University Press, Cambridge,1983.

③ [英]狄拉克著、陈咸亨译：《量子力学原理》，科学出版社1965年版。

④ 张红：《关于自然科学方法用于社会科学的思考》，《四川师范大学学报》(社科版)1999年4月。

⑤ 王培智等：《软科学知识辞典》，中国展望出版社1988年版，第28页。

(二)计算机在考古应用中的利弊

20世纪60年代以后,计算机作为研究手段得到普遍应用,它使科学家可以进行过去常规手段所不能处理的问题,帮助存储、处理大量的信息,实现信息自动化。电子计算机的出现是人类智力的一个伟大创造,把人类从繁重的脑力劳动中解放出来。计算机技术与大众传媒技术相结合产生的多媒体技术使得各种信息更加立体、逼真。面对日益惊人的考古信息量及其积累速度,自20世纪60年代开始,国外的考古人员就开始在实际操作中运用计算机技术,至今已积累相当多的经验。

伴随考古工作的进展、经济的发展,各种文物的数量愈来愈多,如何很好地研究、保管这些文物成为考古工作一个亟待解决的问题。与此同时,随着考古研究的深入,研究视角从局部转向全局,空间分析成为发展的趋势,考古人员希望尽可能地从实物资料中捕获更多的信息,以便更深入地了解古人。如何更好地进行研究,计算机为此提供了可能并促进了其发展。我们知道,任何一个考古实物资料都具有一系列的特征,既包括器物本身的属性,如颜色、质地、结构等物理化学程度,也反映了它的考古学特性,如制作技巧、形状、用途、文化性质……任何一个遗址或墓葬都是一系列考古特征的集合,它在体现了文化性质等内涵的同时,也有一定的数量关系,所以我们既可以对它进行指述性的分析,也可以进行系统数量的、数学的评述。例如我们可以将一个遗址的陶器进行类型学的排队,也可以通过统计的、图表的形式表现各种陶器的关系和主次地位。广而扩之,面对众多的、离散的却各具系列特征的考古资料,我们可以用数理方法进行定量的研究。也就是说,我们只要将考古遗存的信息标准化,输入计算机中,就可以利用设计好的等级法则、程序处理来分析资料。一般地,我们将考古信息的基础资料输入存储到计算机内,包括各种遗址(平、剖面图、位置图)、器物图片(如俯视图、剖面图)、统计图表,然后再利用数学语言进行多维分析系统模拟,多采用矩阵的形式,横行表示同一考古学信息的不同特征的计量值,竖行为不同考古学信息的相同特征的计量值。

$$X=\begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ X_{31} & X_{32} & \cdots & X_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{pmatrix}$$

计算机技术在考古工作的应用中具有以下优点：

（1）有利于考古发掘与研究时资料的快速查询与排序对比，并可同时打印出文物档案、查询结果和对比结果，减轻人工抄写和查询的繁重劳动和重复劳动。

（2）有效地对各种考古实物分析、检测结果进行处理。一般地，各种分析实验设备都配有计算机部分；同时它在排除各种影响因素方面比较客观、科学。

（3）有利于从更大的空间范围内进行宏观的、动态的、多变量的分析，如区域文化研究、贸易系统研究、遗址系统空间研究，尤其是运用各种模式进行多元研究。

（4）它是GIS、GPS技术的基础和必备设施。

（5）有利于考古资料的科学化管理，避免人为操作过程中产生的错误、丢损以及人的经验性、随意性所造成的损失，并可以动态、灵活地记录和修补原有信息。

（6）通过联机网络化可实现考古资料共享，促进各种学科的交流。描述一个器物需要许多言语，可是计算机上显示的图片能提供更直接的形象。每张DVD-ROM的容量为4.7～17 G，已相当于一个中小型图书馆的藏书容量。它们为各类人员查询、浏览、检索提供了快捷工具①。

计算机在考古学中的应用无疑会促进考古学的发展，但也存在一些问题。首先是考古学软件开发离不开软件专业人员。一般是考古人员与计算机公司合作，但市场经济下这类软件的经济利益不高，而且计算机的功能在不断发展，软件也需要不断升级，这些会对考古工作造成不利影响。其次在操作中不可避免地带有记录者的个人选择、操作水平、经验程度，这些直接影响着工作的成果。用计算机编译考古学“在很多环节上仍然存在着不规律性、不确定性和多解性”②，所以，科技考古工作者除了加强专业知识外，还要尽可能掌握计算机知识。

二、文物形态分析的几种方法

（一）文物分类

当获取考古资料后，对其的研究工作就开始了。首先要将文物分成不同的类别，才能发现、总结规律，进行深层次的研究。文物的分类仍然遵循类型学的原理和方法，只不过分类的标准更加数量化、科学化。

① 谢伟：《多媒体技术在文物事业发展中的运用》，《文博》1999年第1期。

② 李季：《编译与解读——迈向新世纪的中国史前考古学》，《东南文化》2000年第1期。

文物分类的第一步是进行统计，运用数学中的统计学方法，包括数理统计和模糊统计①。实际上，传统考古学在室内整理中就应用了数理统计。在室内整理时，对各种类型器物进行统计，再根据每类器物的百分比来探讨文化属性、地域差异和时代早晚。在某种程度上，可以说每个考古学文化的区系类型研究都是以大量的统计图表为基础的。例如龙门石窟的造像，大窟中属于唐高宗时期的石窟造像中结跏趺坐佛为主像占75%，武则天时的占91.5%；小窟的唐高宗时期结跏趺坐像为主像占81.6%，武则天时占86.9%，玄宗时的占97.3%②。从这些数字可以约略看出，自唐高宗以后至玄宗开元、天宝年间，阿弥陀净土信仰日益高涨，而弥勒净土信仰则呈现出逐渐削弱的趋势。

除了百分比的运用外，过去还常常以统计图表的形式来表现遗存在时间、空间上的各种量的变化，附在发掘报告之后的各种登记表格体现了遗存的性质、相互关系。例如根据郑州龙山文化期与郑州、小屯殷商文化各期陶器的比较（表10.1、表10.2）可知，郑州龙山期与郑州殷商期、小屯殷商期差异明显；前者为灰陶，且以夹砂灰陶为主，纹饰多见绳纹，素面、篮纹、方格纹其次，也有少量磨光纹。而后两者也系灰陶系列，但泥质灰陶占多数，夹砂灰陶次之，还出现了红陶、硬釉陶、白陶，而纹饰则以绳纹为主，素面纹次之，还有磨光陶、篮纹、方格纹等。据此，我们可以断定郑州、小屯殷商期文化基本一致，面与龙山期文化则不同。

在了解了文物的某些规律之后，还可以建立一些识别规则，以便对新的文物进行分类。目前，主要是用判别分析法，它是根据已掌握每个类别的若干样本的数据信息，总结出客观事物分类的规律性，建立判别公式和判别准则。当遇到新的样本时，只需依判别公式和准则就可进行判断③。郎惠云等用此法对唐三彩的传播和流通进行了分析和研究，结果较好④。判别分析法虽然好用，但必须是在占有大量的资料和详尽的分析基础上才可应用，其可靠性必须有待于其他方法的检验。

---

① 贾伟明：《数学方法在考古学研究中应用的探讨》，《考古学文化论集》（一），文物出版社1987年版，第34页。

② 段鹏琦：《石窟寺考古的新发现和研究》，《新中国的考古发现和研究》，文物出版社1984年版。

③ 陈建立：《数学分析方法在考古学中的应用》，《中原文物》2000年第1期。

④ 郎惠云等：《从成分分析探讨唐三彩的传播与流通》，《考古》1998年第7期。

表 10.1 郑州龙山文化期与郑州、小屯殷商文化各期陶系比较表

陶系 期别	灰陶		红陶		黄陶		黑陶		硬釉陶	白陶	总计
	泥质	夹砂	泥质	夹砂	厚胎	薄胎	厚胎	蛋壳		泥质	
郑州龙山期	35.507	56.134			1.144	1.652	4.773	0.789			99.999%
郑州殷商早期	58.766	39.185	0.684	1.302			0.041		0.021		99.999%
郑州殷商中期	59.406	39.106	0.164	1.154			0.028		0.140		99.998%
郑州殷商晚期	57.757	37.171	3.580	1.372					0.119		99.999%
小屯殷商期	79.96	18.53	1.25								99.74%
小屯殷商期	90.07		6.86				1.07		1.73	0.27	100%
备注	郑州殷商晚期其他灰坑也有厚胎黑陶										

表 10.2 郑州龙山文化期与郑州、小屯殷商文化各期陶器纹饰比较表

纹饰 期别	篮纹	绳纹	方格纹	素面	附加堆纹	磨光	兽面纹	云雷纹	划纹	圆圈纹	划刻记号	其他	总计
郑州龙山期	19.408	34.635	13.610	22.564		9.783							100%

续表

纹饰 期别	篮纹	绳纹	方格纹	素面	附加堆纹	磨光	兽面纹	云雷纹	划纹	圆圈纹	划刻记号	其他	总计
郑州殷商早期	0.170	68.712	0.690	19.817	1.874	8.531	0.010	0.015		0.072	0.015	0.092	99.998%
郑州殷商中期	0.266	65.062	0.378	23.777	2.745	6.661	0.037	0.107		0.840	0.047	0.079	99.998%
郑州殷商晚期		66.885	1.074	9.308	1.491	21.062						0.180	100%
小屯殷商期		63.55		29.13					3.3				95.98%

目前,考古学家已利用类型学的原理实现了计算机对大量器物、文化的自动分类。习惯上存在两种分类法,一类是"类型断定法",它依靠模式识别,断定标本是否属于某个类型。首先向计算机输入已知类别的特征集合,然后将具有最小误差概率的新标本编入集合,根据计算机的集合运算结果来断定新标本的类别。另一类是"群集分类法",它将标本输入计算机中,不需输入已知的集合,计算机可以将某种意义上相似的器物自动归为一类并建立类别,而且各类尽可能地不相似①。

"分类是以统计为前提,依据事物的异同而集合成类的过程"②,需要专门的统计方法和统计软件,国内外已经有了不少的软件系统,例如李科威在系统设计中规划③:对于类型学的工作对象之间的基本关系,主要采用数学方法处理;对于最后

① 金国樵等:《物理考古学》,上海科学技术出版社 1989 年版,第 267—268 页。

② 李科威:《考古类型学的计算机实现、问题和前景》,《考古与文物》1990 年第 5 期。

③ 李科威:《考古类型学的计算机实现、问题和前景》,《考占与文物》1990 年第 5 期。

结果的求得及发掘品的逻辑框架与历史发展模式之间的关系，主要采用人工智能的方法。他归纳了六种直观的函数式文化发展模式。然而，计算机上应用类型学时所用的资料来源于考古工作者采样的描述，而器物间共同的参比部分在各个器物上又不尽一致，比如两件陶器，它们的参照部分口沿、花纹不一致，尽管出土于相同的地层或遗址，不能排除两者可能是两个类型，所以计算机类型学有待于进一步完善。

（二）考古序列年代的研究

计算机考古年代序列分析系统（CASA）是我国首次建立的计算机辅助系统，它采取了汉字表述和人机对话，以及附加子程序等，以便考古学家直接运用或中途检验，或随时对数据调整等。CASA 是将类型学的序列排队转化为统计学问题，利用计算机反复演算由器物型式代表的不同考古单位诸因素间相关数值的大小，排定考古单位的前后序列，最后以矩阵图形形式表示。

CASA 系统依据的是布林纳德－逻宾逊原理、方法和系统。布林纳德－逻宾逊方法直观的考古意义是①：假定墓葬（或遗址）及其出土的有关器物均按早晚顺序排列成相关矩阵，则器物应集中在对角线附近。若利用数学方法将原先杂乱无章的发掘品登记表加以调整，排列成上述矩阵，即可推断出器物的早晚顺序。

操作时，将器物排列成行，墓葬排列成列，顺次编号，墓葬中出土器物无论多少均以一个（＊）表示。各行将各器物所处列位置号相加，除以器物数为该行行值（ai）。同样地各列以各器物所处行位置号相加，除以器物数为该列列值（ak）。每行（或列）中器物位置最大号与最小号数之差为该行（或列）的跨度差（S），以所有行与所有列的跨度差之和为判别值（G）。然后按行值大小排列一次，再按列值大小排列一次，再次计算上述各值。如此类推，直到判别值（G）最小为止。这时器物数目就大致集中在矩阵的对角线附近，而这样排列的器物顺序就代表了它们的早晚时序，依此可以对墓葬进行早晚分期。

裴安平、李科威利用 CASA 系统分析了江陵雨台山楚墓陶器②。雨台山墓可参与比较的墓葬和器物分别有 416 座和 109 种，进行了 8 次分析。或选用全部墓

① 仇士华、蔡莲珍：《科技方法在考古学上的应用》，《中国考古学年鉴》，文物出版社 1990 年版。

② 裴安平、李科威：《雨台山楚墓 CASA 年代序列分析与相关问题探讨》，《考古》1991 年第 5 期；《中国考古学年鉴》，文物出版社 1990 年版。

葬和器物种类的，或用组合齐全的墓和时代代表性强的器物的，或用日用器组合、陶礼器组合齐全的墓等。其中选用日用陶器组合齐全墓的第6次分析和选用陶礼器组合齐全墓的第8次分析，两次都用了与原报告相同的器物种类，得出结果与原报告的吻合率分别高达94.2%和99.2%。

用CASA对考古遗存进行年代分析，内在逻辑性强，各个遗迹、遗物都被有序地排列出来，而且将排列时出现的倒排现象降到最低限度。但是，在使用CASA时要注意，器物的分型定式必须高质量，遗迹单位的地层关系必须绝对清晰；而且最后的分析结果必须接受地层学、类型学的检验，它是遗存年代分析的一种辅助手段。

（三）遗迹、遗物间的研究

考古工作的目的是"以物见人"，要透过不同的文物及其体现的文化特征来解读其所反映的文化关系，即遗迹、遗物间的研究；而且，由考古发掘所获的资料相对于当时的社会来说，数量是很少的（甚至是冰山一角），或者是不典型的，所以，通过实物资料去复原古代社会的方法本身就是一个随机的抽样，只具有统计学的意义。更重要的是，各种考古现象之间的关系是复杂的，传统考古学主要依靠人们的经验和比较、归纳，这些远远不能发掘出考古遗存间的所有信息。要破译出遗存间所有的信息，必须首先是对之进行精确的统计、分析，即定量分析。在此基础上，对不同量的相似程度进行比较，以判断它们的关系。譬如考古学中经常碰到的问题是：一个器物或一组器物，与典型的器物群之间的相似程度到底达到多少，才算属于同一种文化内涵？在划分考古学文化的区系类型时，常见的问题依然是：一群考古学文化遗存的共同特征达到什么程度时为一种文化。诸如此类的问题带有不确定性和模糊性，这就需要定量的分析，通过计算机用数理统计方法、多元分析法等数学方法就可解决此类问题。

1. 多元统计分析法

由于考古遗存的多样性，任何一件遗物都从不同角度折射着人类的行为。用数学方法分析考古遗迹、遗物，需要定义常量和若干变量，而不同变量之间的关系又很复杂，如青铜器的分析，要对纹饰、形制、铭文、年代、元素组成、出土地点等方面加以考虑，每一件青铜器的各因素组合又不同，所以须进行复杂的运算，借助于多元统计分析法可解决此类问题。

多元统计分析是统计学的一个重要分支,是研究多个随机变量之间相互依赖关系以及内在统计规律的一门统计学科。具体说来,即分析多个随机变量的观测数据,探索变量之间的相互关系,根据这些变量的内在变化规律,给出研究对象的分类结果①。早在20世纪20年代,斯特朗(Strong)就将统计对应系数应用于考古类型的排列分析中。50年代,福特(Ford)和斯博尔丁(Spaulding)首次将统计学引入考古类型学和地层学的研究中,通过对器形、装饰和其他文化特征的统计分析,建立了考古文化分期的关系。此后,随着多元统计分析自身理论和方法的发展,它在考古学中的应用日益广泛,涉及考古学的众多分支领域,并取得了许多重要成果。上面介绍的判别分析法就是一种多元统计分析法,下面简介这一领域最常用的其他多元统计方法。

主成分分析法是设法将原来变量重新组合成一组新的互相独立的几个综合变量(主成分)来代替原来的变量,同时根据需要从中可以确定几个较少的综合变量(主成分)尽可能多地反映原来变量的信息②。考古学用主成分分析就是所有器物原始属性的综合情况,对这些原始属性进行高维变量空间的降维处理,也就是平移和旋转变化原坐标系,使新坐标的原点与数据群点的重心重合,这样新坐标系的第一轴对应于数据变异的最大方向,新坐标系的第二轴与第一轴标准正交且对应数据变异次最大方向。陈铁梅等人对河南二里头二期至人民公园期的陶豆作了主成分分析③。他们首先把陶豆的各形态分别加以数量化,组成一个13行6列的原始数据矩阵,再用特征向量乘以正规化的原始数据矩阵便得到6个新的综合属性,所有的计算都在计算机上完成。最后的结果以坐标的散点图表示出来,从图10.1中可以看出13件陶豆分为3组,恰好与原报告的3个分期一致,第一主成分值的大小大致代表了时代的先后;而且三个期段之间陶豆形态的差异显著,说明从二里头到二里冈,从二里冈到殷墟段的陶豆,后者均非前者的直接继承。

2. 概率数理统计

当数学划分为确定型数学、随机数学、模糊数学,其在其他科学的应用愈来愈

① 于秀林、任雪松编:《多元统计分析》,中国统计出版社1999年版。

② 陈建立:《数学分析方法在考古学中的应用》,《中原文化》2000年第1期。

③ 陈铁梅、何驽:《计算机技术对河南省二里头二期至人民公园期陶豆分类的尝试》,《考古学文化论集》(二),文物出版社1989年版,第340—345页。

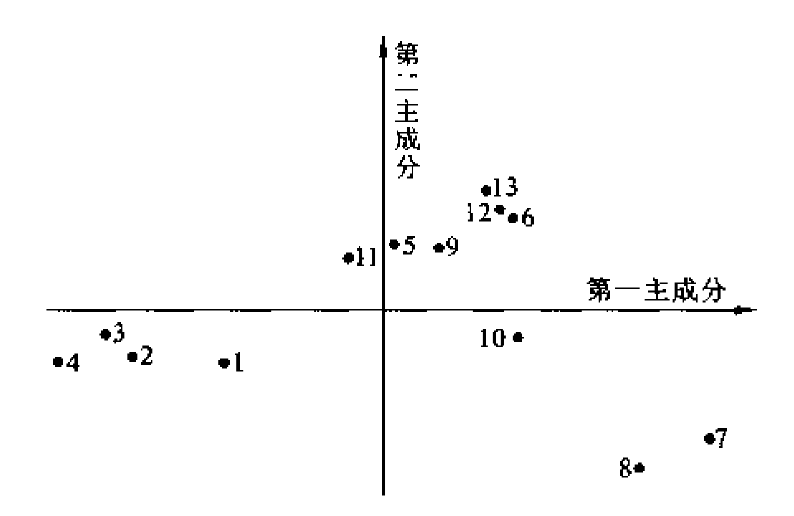


图 10.1　13 件陶豆在第一、第二主成分坐标中的散点图

广泛。确定性数学模型要求背景、对象具有确定性、固定性，对象间具有必然的关系，随机性数学模型的背景、对象具有或然性或随机性，而模糊性模型的背景、对象及其关系均具有模糊性①。考古学过去所用的统计图表、百分比等都属确定性数学模型，它清晰地表示出考古资料的每一信息及与其他信息之间的关系。然而考古资料中精确性强的除了每种遗物的外观描述之外，其他方面的研究常有不确定性。现在考古学家将注意力集中于那些无言的未知或可疑数，期望从中得到更多的古代人类信息，这就必须凭借随机数学和模糊数学。

随机性数学最主要的方法是概率数理统计。概率表示的是随机现象量的规律性，即“频率的稳定值”，是一次试验中对某事件发生的可能性大小的数量描述，用数学公式表示为 $P(A)=m/n$，其中 $P(A)$ 表示概率，m 表示试验中发生的次数，n 表示这类事件发生的所有数目。用概率分析方法分析考古资料，可以归纳出典型器物的型式演变，将更有助于考古学文化的源流、特征等的研究。经过实验，其结论可靠、明细，并可以与报道的材料相互验证。在此以朱乃诚用概率分析法对陕西渭南史家墓地进行的研究为例说明②。首先根据概率分析的需要确立两组典型器

① 杨伦标、高英仪：《模糊数学原理及应用》，华南理工大学出版社 1995 年版，第 1 页。

② 朱乃诚：《概率分析方法在考古学中的初步应用——以陕西渭南史家墓地的葬为分析对象》，《史前研究》1984 年第 1 期。

物，即两座典型墓葬。这两组典型器物具备：可能是墓地上最早、最晚的两座墓；这两座墓葬都需有一组器物随葬，并且绝大多数为常见的器物。通过对渭南史家新石器时代的43座墓葬进行分析，确定以M10、M14分别为早晚两个典型墓葬，以M10出土的Ⅳ式钵、Ⅱ式罐、Ⅶ式罐、Ⅱ式葫芦瓶；M14出土的Ⅰ式钵、Ⅵ式罐、Ⅰ式葫芦瓶为两组典型器物。第二步是对器物组合的概率计算，根据$P(A)=m/n$公式，m为各类器物中的每一种器物与一组典型器物组合的次数，n是各类器物与一组典型器物可能组合的次数。经过对原报告的墓葬登记表进行统计、排列，确定了三组器物，分别代表了早、中、晚三个相对时段。第一组器物为钵Ⅳ，罐Ⅱ，葫芦瓶Ⅱ，葫芦瓶Ⅳ，葫芦瓶Ⅶ，罐Ⅶ；第二组为钵Ⅲ，罐Ⅴ，细颈壶Ⅰ，钵Ⅱ，罐Ⅲ，罐Ⅷ，葫芦瓶Ⅲ，细颈壶Ⅱ，碗Ⅱ，盂；第三组是钵Ⅰ，罐Ⅰ，细颈壶Ⅲ，罐Ⅵ，葫芦瓶Ⅰ，葫芦瓶Ⅴ，葫芦瓶Ⅵ，瓮Ⅰ，瓮Ⅱ，碗Ⅰ。第三步将计算的各类器物与两组典型器物组合的两种概率比较，排列出各类器物的相对早晚关系。依据等差数列求和公式$\frac{n(n+1)}{2}$，将出土陶器的36座墓分为6个阶段，并对各阶段墓葬及器物组合进行判定。第四步是对判定结果进行验证，通过地层检验和器形检验发现判定结果基本吻合，并归纳出典型器物的演变特征，而且校正了报告材料中的墓葬登记表与底稿七处差异。

目前我国学者经过数年探索，已制成“概率考古分析方法”软件①，并逐步将此法普及，但同时必须看到概率法的不足：

(1) 它的分析程序比较复杂；

(2) 墓地的各类器物的分型定式一定要精确；

(3) 墓葬需要至少有一组实物随葬；

(4) 墓地的墓葬数量不能太少，越多结论越可靠；

(5) 墓地要连续作用，中间有缺环的不能使用。

我们知道，考古发掘所获的资料仅是过去社会的一部分，在这个意义上，采取的是用样品（部分）推断整体的过程，因而我们不能绝对地肯定概率统计的结果并将之推广，同时要参考其他更广、更多的信息。此外，考古报告中的分型定式也不

① 中国社会科学院考古研究所考古技术实验研究中心：《考古研究所科技考古二十年》，《考古》1997年第8期。

可避免地带有一定的主观性,我们在使用材料上要十分慎重。

3. 模糊聚类法

1965 年,美国的控制论专家查德(L. A. Zadeh)提出模糊数学的理论,很快在各个学科中得到应用,模糊数学在考古学中的应用前景乐观。在自然界和社会现象中,绝大多数的概念都是不确切的,更多的差异具有明显的相互过渡阶段,处于中介过渡的差异具有亦此亦彼性,这些没有明确外延的概念称为模糊概念。如说一个人"很漂亮",那么与不漂亮的分界线不明显。模糊数学就是用定量的数学方法去处理模糊现象。一般用集合来表示具有某种属性的全体,任何一个事物都会有一个隶属集合,并且用隶属函数表示,如青白瓷在青瓷的隶属值为 0.3,说明它属于青瓷的程度比白瓷的程度浅,应归属于白瓷中。在考古学中不仅器物如此,而且文化类型的划分也存在同样的情况,有些文化介于两种考古学文化因素中间,我们往往看它其中的主要因素偏重于哪种文化就将其归到该文化中,用隶属函数来表示将会更直观、清晰。目前世界各地的考古学文化框架已经建立,面对大量的处于中介性过渡的考古材料,使用模糊聚类分析法处理效果更佳。

聚类分析(Cluster Analysis),又称为群分析,"是对事物按一定要求分类的数学方法"①,用数量化的形式描述事物间的相似程度,做出相应的谱系图(图10.2)。

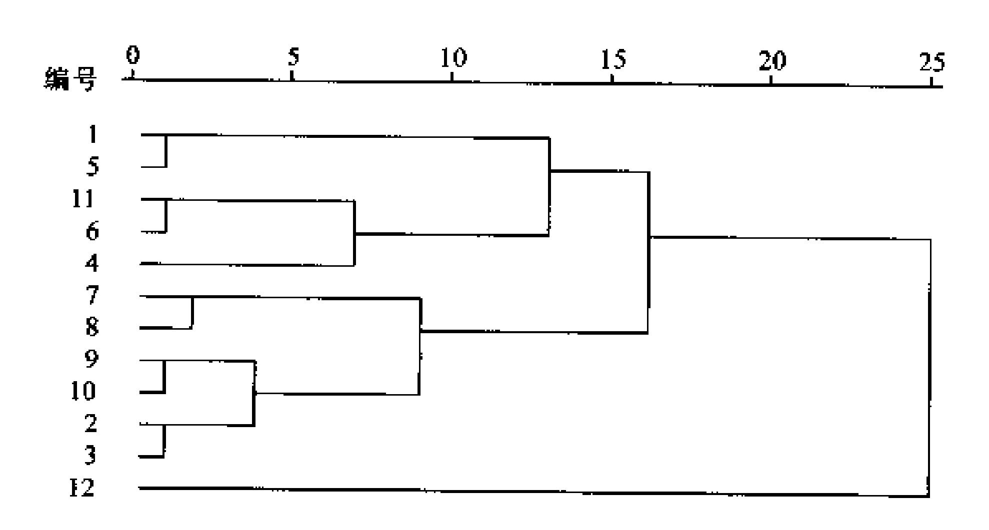


图 10.2　聚类树形图

① 李树根、董加礼:《模糊数学在管理中的应用》,吉林工业大学出版社 1986 年版,第 50 页。

国内外的学者用这种方法研究了大量的古陶瓷、钱币及其他遗物。王迅用模糊聚类方法对山东境内的兖州、烟台、潍坊、菏泽和安徽六安地区及江苏北部的晚于龙山文化早于商代的遗址进行了分类①。他通过对六处器物的相似程度评定的相似系数得到下列模糊关系矩阵，其中 R 表示集合 S 的相似关系，是一个模糊相容关系。

$$
\begin{array}{cccccc} \text{菏} & \text{兖} & \text{潍} & \text{烟} & \text{六} & \text{苏} \end{array}
$$

$$
R=\begin{pmatrix} 1 & 0.6 & 0.7 & 0.5 & 0.2 & 0.3 \\ 0.6 & 1 & 0.9 & 0.7 & 0.3 & 0.6 \\ 0.7 & 0.9 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0.6 \\ 0.5 & 0.7 & 0.7 & 1 & 0.3 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.3 & 1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0.7 & 0.2 & 1 \end{pmatrix}
$$

再经过几次一次自合成，由模糊矩阵 $R3$ 得出下表及后面的矩阵演算和分析结果。从表中可以看出，菏、兖、潍、烟、苏应归属于同一种文化即岳石文化，而六则另属一种文化。陈铁梅也用聚类方法对该墓地进行研究，得出比较一致的结论②。

	菏	兖	潍	烟	六	苏
菏	1	1	1	1	0	1
兖	1	1	1	1	0	1
潍	1	1	1	1	0	1
烟	1	1	1	1	0	1
六	0	0	0	0	1	0
苏	1	1	1	1	0	1

模糊聚类方法在考古学中的应用比较复杂，典型单位、器物的从属关系的判定

① 王迅：《模糊数学在考古学研究中的应用》，《考古与文物》1989 年第 1 期。

② 陈铁梅：《多元分析方法应用于考古学中相对年代研究——兼论渭南史家墓地三种相对年代分期方案的比较》，《史前研究》1985 年第 3 期。

等带有主观性,会直接影响相似系数,对其结论要进行验证。在引进显著性的检验后,聚类分析能用于器物的鉴别、分类和区划,成为一种比较严格的数学方法。如L. A. G. Linsman 等人对意大利文艺复兴时期人像纪念章用聚类法研究,得出 16 世纪的杂质远远低于 15 世纪的,表明文艺复兴时期的人们掌握了大量金属学的知识①。

第二节　文物形象观察

在文物研究中,传统的研究方法通常是使用肉眼观察文物,或者借用放大镜、显微镜观察文物的各项外表信息。但是随着考古技术的不断发展和文物研究方法的不断改进,越来越多的现代工业手段被引入文物研究中的观察环节,使得我们可以透过表面形态观察文物的内部信息,为文物研究和文物修复、保护提供肉眼无法看清的内部信息。目前使用比较成熟的技术有:X 光照相技术、中子射线照相技术、红外成像技术等。

一、X 光照相技术及其应用②

X 射线发现于 19 世纪末,当时被用子医学方面。X 光照相技术,应用于文物艺术品的研究,始于 20 世纪二三十年代。开始主要限于纸质文物艺术品,如绘画、油画、邮票等的真伪鉴别,以及艺术家创作构思或艺术家思想变化(通过比较艺术家底稿和作品的差别)等研究。随着 X 光技术的发展,X 光管发射功率的提高,X 光照相技术开始用于博物馆不同材质藏品的分析检测。

X 光的主要应用是:通过观察文物内部的形态,反映其相关的结构特征、古代及近现代修复痕迹等,为器物真伪的辨别和古代工艺、技术的研究提供依据。在我国,把 X 光照相技术应用于文物研究始于 20 世纪 70 年代,如上海博物馆、北京科技大学等,都使用过这一技术。西安文物保护修复中心在与意大利合作期间,把 X 光照相技术系统用于文物的保护修复和研究工作中,以反映文物的保存状况和器

① 陈建立:《数学分析方法在考古学中的应用》,《中原文物》2000 年第 1 期。

② 杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

物的古代制作技术特征等，取得了不少经验。实践表明，X光照相方法还可以应用于考古现场出土文物及实验室考古学的系统研究，从而使文物及考古学的科学研究更加全面。

（一）X光照相技术原理

实验证明，高速运动着的电子在突然被阻止时，伴随着电子动能的消失或转化，会产生X光。如图10.3所示，在阳极（4）和阴极（5）之间加上高压，使阴极上产生的电子向阳极高速运动，阳极板截止高速运动的电子流，从而在阳极上产生X光。高速运动的电子流动能比较大，但其大部分都变成了热能，仅很少一部分（约1%）变成了X光。由X光管产生的X光，经聚焦面打出，其在空间聚焦面D处的X光辐射强度与X光管电流、管电压的n次方成正比，与距离的平方成反比，用下式表示

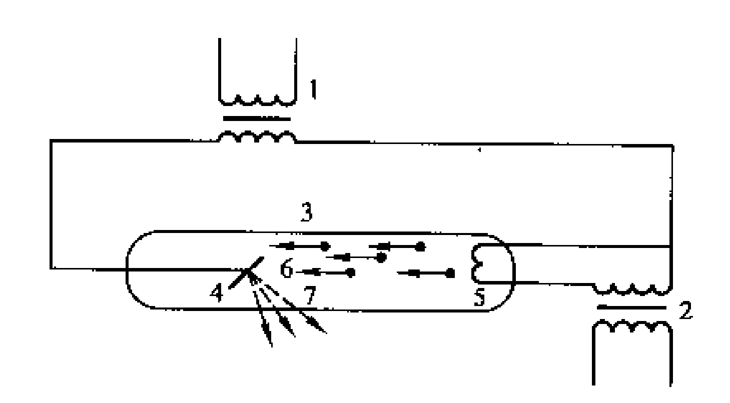


图10.3　X光产生装置原理示意图

1. 高压变压器　2. 灯丝变压器　3. X光管　4. 阳极
5. 阴极　6. 电子　7. X光

采自杨军昌：《X光照相技术在文物及考古研究中的应用》，《文物保护科学论文集》，文物出版社2000年版。

$$I = \kappa \frac{mA \cdot \kappa V^n}{D^2} \quad ①$$

式中，I为X光在D处的辐射强度；

mA为X光管电流；

κV为X光管电压；

D 为距焦面的距离；

n 为指数（取决于管电压及滤波特性，一般取 2～5）。

在 D 处，X 光辐射剂量 Dose 的大小是与时间 t 相关的物理量：X 光照射时间越长，D 处所受的 X 光辐射累积量就越大，呈正比关系

$$\text{Dose} = I \cdot t \quad ②$$

把①带入②，可以得到下式

$$\text{Dose} = \kappa \frac{mA \cdot \kappa V^n \cdot t}{D^2} \quad ③$$

式中，Dose 就决定了 X 光片上的曝光量。参数 mA、t、D 仅对胶片的曝光量有一定的贡献，而管电压 κV 不仅对胶片的曝光量有影响，并且决定胶片中物体透射像的黑白对比度：硬 X 光产生的对比度小；软 X 光产生的对比度大，而且能够表现更多的细节。

X 光作为一种电磁波，当它与场内的物体作用时，具有电磁波的普遍性质。当 X 光在辐射范围内传播遇到物体时，一部分被反射，一部分被透射，一部分被吸收。所以，X 光经过物体后，其辐射强度会衰减。假如物体为均质，厚度为 h，X 光经过它后，其衰减强度符合下面的规律，即

$$I_t = I_0 \cdot e^{-\mu h}$$

式中，e 为自然对数的底（e＝2.718）；μ 为物体的衰变系数。

对于均质材料的物体来讲，假如用两张胶片分别置于物体前后，用同样的参数曝光，那么物体前一张胶片上的曝光量大于后一张，X 光片上的特征是前一张要比后一张黑。假如在这一均质材料物体内有一正方体的空洞，那么经过这一空洞的 X 光能量相对其他部位衰弱的就要少些，反映在 X 胶片上，这个部位由于所透过的 X 光多相对其他位置稍黑。现在的研究方法反过来，通过 X 光片上物体的透射像，来推断物体的内部形貌特征，或者物体内部结构特征。实际中的物体情况是比较复杂的，大多为非均质材料，那么 X 光经过物体后，吸收 X 光的局部差别就会表现出来，呈现在胶片上或明或暗。通过记录在 X 光片物体透视影像的丰富信息及其特征，来判断文物内部的结构特征，或者相关的其他特征，如文物保存状况、前修复痕迹、相关历史艺术信息、相关器物制作工艺特点等。显然获取信息的方法及对于信息的正确判断需要实际的工作经验。

通常，X 光在波长范围为 0.01～100 埃，两边分别与紫外线及 γ 射线相重叠，

其中,1 ~ 0.05 埃或更短,称为硬 X 光,波长大于 0.5 埃则称为软 X 光。一般硬 X 光能量比较大,穿透能力比较强,多用于金属文物、大型石雕刻等的研究;软 X 光能量比较小,穿透能力弱(因被物体强烈吸收),但能更多地表现内部信息的细部,一般主要用于陶瓷器、漆木器、古字画、薄壁金属文物、玉器及小件石刻的分析研究。下面列出不同文物材质所需要的输出工作电压(表 10.3):

表 10.3 不同文物材质所需要的输出工作电压

输出工作电压(千伏)	10 ~ 30	30 ~ 85	100 ~ 250	260 ~ 1000
文物材质	水彩字画、油画、邮票等	陶器、玉器、瓷器、漆木器	青铜器、铁器、石雕刻、大型陶俑	大型青铜器、大型铁器、石雕刻

(二)X 光设备及试验方法

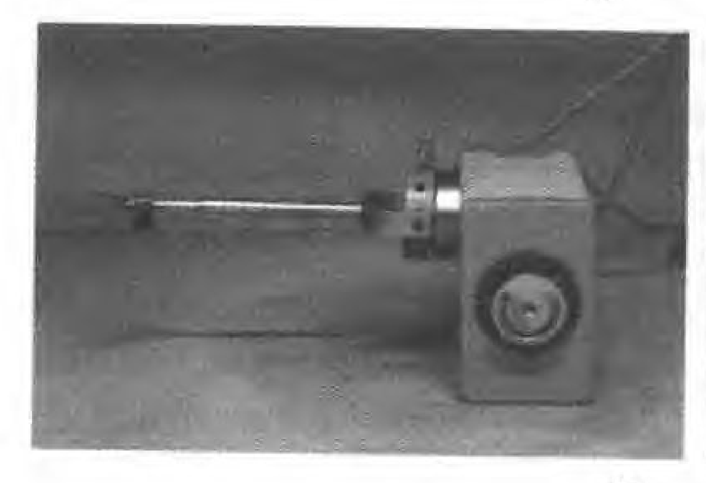
X 光机主要由 X 光发生器、高压变压器、控制箱及其他附属配件构成。目前可用于文物照相的 X 光机有:高能 X 光机(型号 ART - GIL350/6 型,工作电压为 100 ~ 350 千伏,最大工作电流为 6 毫安);便携式低能 X 光机(型号 ATR - GIL Be,工作电压时是 10 ~ 85 千伏,最大工作电流为 6 毫安)。图 10.4(a)右为高能 X 光机控制箱,包括电压、电流、曝光时间及其仪表;图 10.4(a)左为固定在铅室内的高能 X 光机,图中表明其 X 光发生器、定位器、测距尺、文物及 X 光片的位置分布。图10.4(b)右为低能 X 光机控制箱,同样包括电压、电流、曝光时间及其仪表;而图 10.4(b)左为便携式低能 X 光机,图中表明其 X 光发生器、定位器、测距尺、文物及 X 光片的位置分布。在实际工作中,对工作电压、电流和曝光时间的选择需要积累工作经验方可准确掌握。

(三)在文物及考古学研究中的应用

X 光经过物体后的衰减,决定于物体的衰减系数 μ 和物体厚度 h:非均匀材料对 X 光的吸收不同,在 X 光片上会以不同的黑白对比形式表现出来;均质材料厚度不同,对 X 光的吸收也不同,同样在 X 光片上表现出不同的黑白对比度。通过 X 光片上所成文物的 X 光像,判断相关文物的一些对应信息。例如,反映文物破




(a)




(b)

图 10.4　X 光设备及其控制箱

(a) 高能 X 光设备及其控制箱　　(b) 便携式 X 光设备及其控制箱

采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

损程度、修复痕迹、提取文物相关历史和艺术信息(文字、装饰花纹),显示器物内

部技术结构特征等，为文物保存状况的评估、历史学和艺术形式的研究及古代工艺技术的探索提供直观的科学依据。

1. 文物有关的历史艺术信息的揭示

考古学和历史学研究的主要内容是揭示与文物有关的历史艺术信息。对于文物，除了器形以外，就是揭示器物上的文字和纹饰。

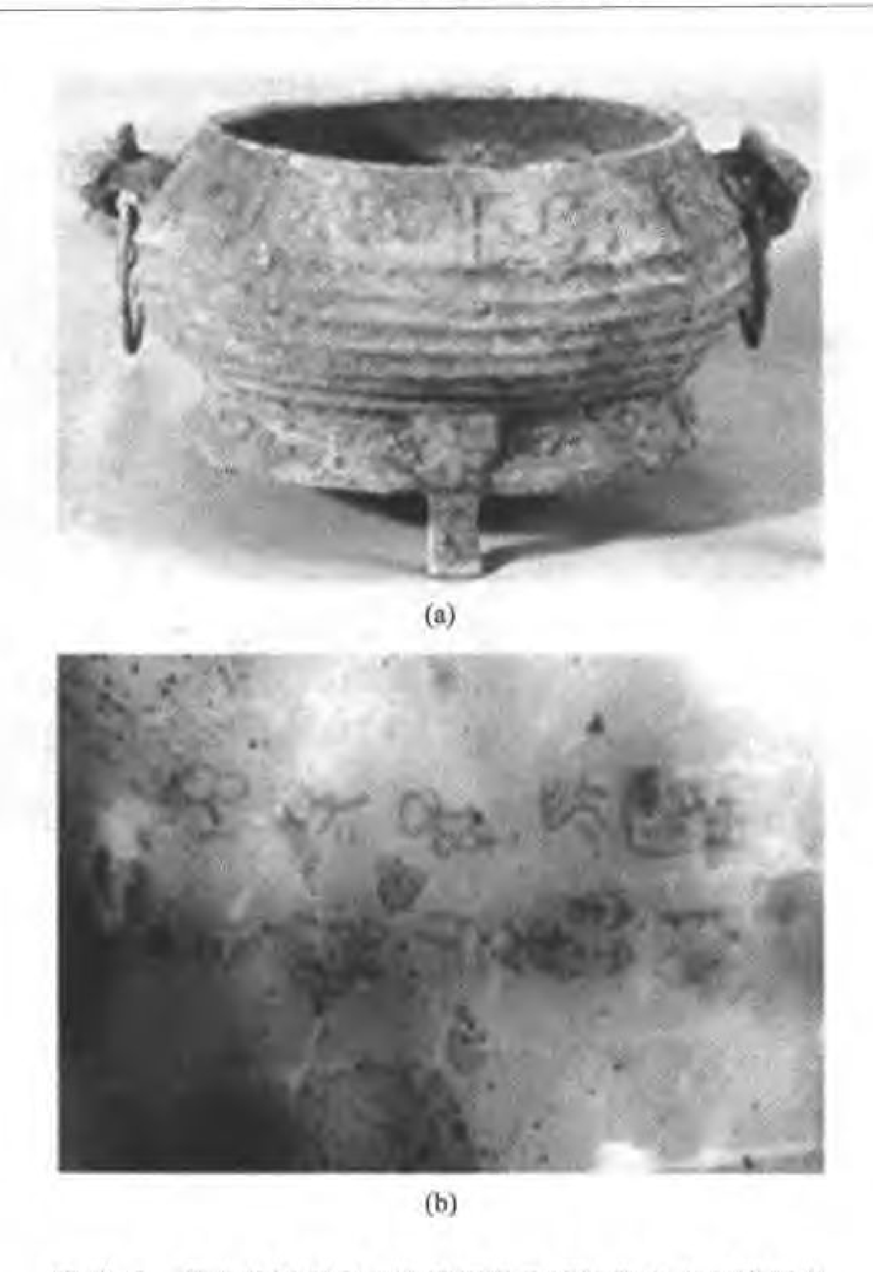
X 光照相方法可以揭示其覆盖物和包裹物之下文物表面的相关信息。图 10.5 所示是一件西周时期铜簋，表面被土锈覆盖。X 光分析表明，这件器物保存状况不错，且显示簋底部有十多个文字。铭文对于青铜器的断代、历史学研究提供了依据。当然，这件器物，一般的修复工作对其不会有什么损伤，但如果一件器物腐蚀损坏得比较严重，不慎的修复操作会造成文物的损伤，甚至破坏，或者使这些相关的历史和艺术信息永远消失，在这种情况下，X 光分析就显得比较重要。图 10.6 所示的 7 世纪错银铁器就是一例，从照片中可以看到器体遭到了严重的腐蚀，似乎基体已完全矿化且脆弱，该器物的 X 光片却显示出了其表面精美的纹饰。如果不作 X 光照相分析，采用直接清理器物表面的方法，可能会损坏精美的装饰花纹，其文物基体也会遭到破坏。图 10.7 为公元前 7 世纪的青铜碗（大英博物馆藏），X 光片清楚地显示出被锈蚀物填充的器物表面的装饰花纹。

不仅如此，用软 X 光分析古字画，还显示出了肉眼不可见的古代字画上的印章，为古字画的真伪鉴别提供了科学依据。如 1977 年，上海博物馆对“文化大革命”期间征集的硬黄本王羲之《上虞帖》进行鉴定，由于年代久远及多次重裱，使其印章模糊不清，给鉴定工作带来困难，但经软 X 光分析后，却显示出了清晰的印章迹象。古字画印章所用印泥中含朱砂（硫化汞），印章表面尽管变模糊，但部分朱砂却渗入纸张的纤维组织内，X 光照相正是把这部分信息反映了出来。另外，X 光片所提供的历史艺术直观信息会引起文物修复师的高度注意，在修复特殊部位时倍加小心，不致使其受到损伤。

1968 年，考古人员利用简单的 X 光照相技术对图坦卡蒙木乃伊进行过一次透视，发现他的颅内有骨头碎片，考古学家据此猜测这位少年法老可能死于严重的头部撞击，而且从墓穴观察来看，有“匆忙下葬”的迹象，表明他的死亡可能十分突然。

2. 提供文物制作的工艺技术信息

X 光照相方法用于青铜器制作工艺信息的例子较多。如反映器物所用的垫片



(a)

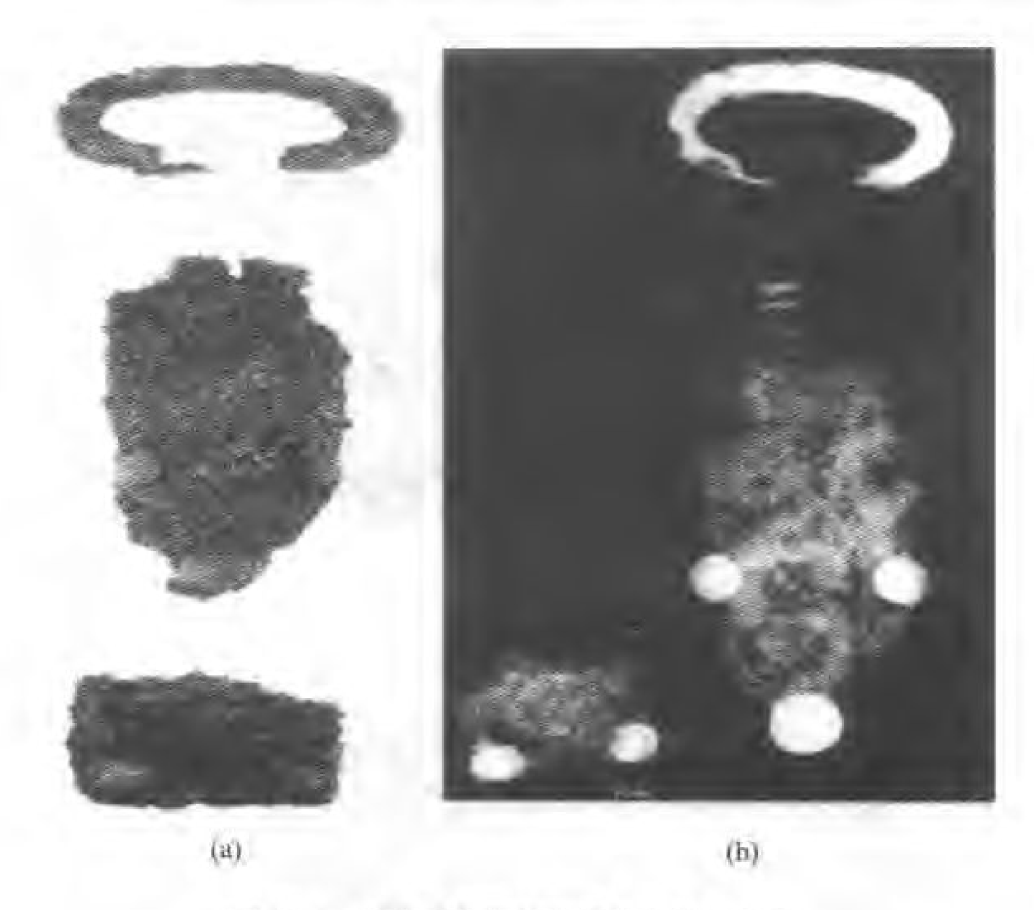
(b)

图 10.5　被土锈完全覆盖的青铜簋及其底部 X 光局部照片

（a）青铜簋　（b）青铜簋底部 X 光局部照片

采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

的形状和分布情况,附件与器体的连接方式等。图 10.8 左边是西周时期的青铜盉,器物的 X 光片显示出良好的保存状况,值得注意的是这件盉盖上部蟠龙制作



(a)　　(b)

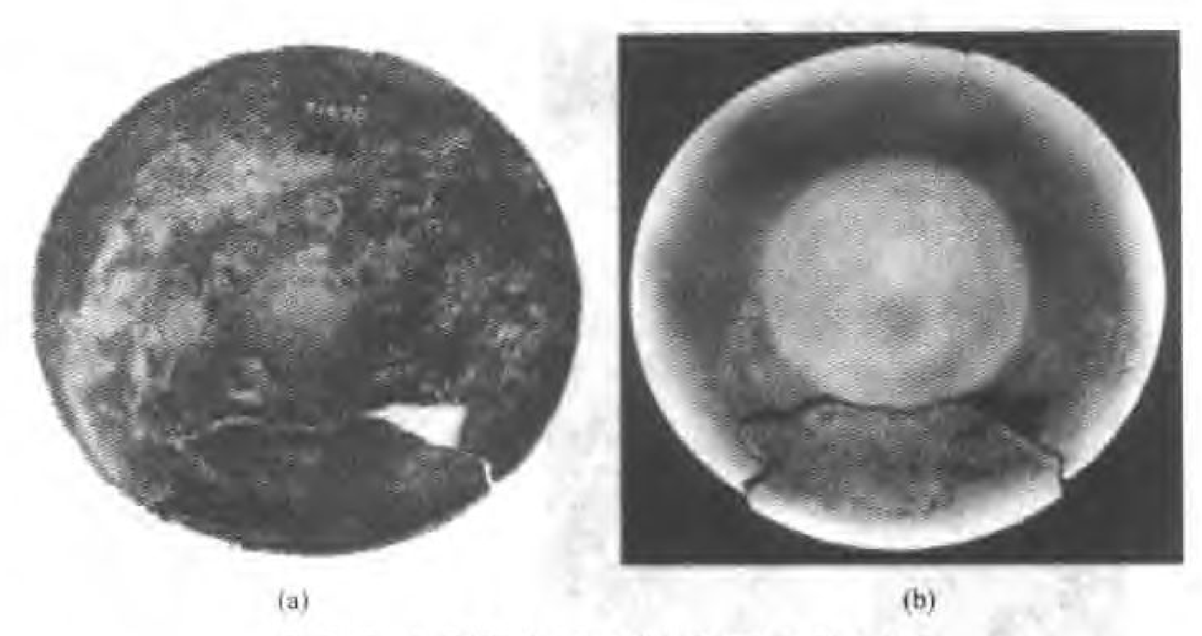
图 10.6　基本矿化的错银铁器及其 X 光片

(a) 错银铁器　(b) 错银铁器 X 光片

采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

情况和器鋬与器体的连接关系。图 10.8 右边是器物盖 X 光图,发现蟠龙内有泥芯的存在,而且可见三个泥支钉及其分布。图 10.9 是器物鋬部与本体连接处的 X 光片及线描示意图,显示出盉物的分铸关系(图中箭头所示的是盉与器体连接处的凸榫),而且清楚显示出盉内芯范的形貌、与芯范成一体的不规则梯形泥支钉形状及其分布。说明古人是先将器盖、盉先分别铸出,然后把鋬嵌入盉体外范中,实现与器物的连接,最后通过铸蛙形铰链,把盖和体相连接。

早期陶器的制坯方法有捏塑法、泥条盘筑法、泥圈叠筑法和泥片敷筑法。到仰韶文化前期,许多陶器开始使用慢轮修整,之后出现了快轮制坯的方法。目前国内



(a)　(b)

图 10.7　表面被锈蚀物覆盖的青铜碗及其 X 光片

(a) 青铜碗　(b) 青铜碗 X 光片

采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

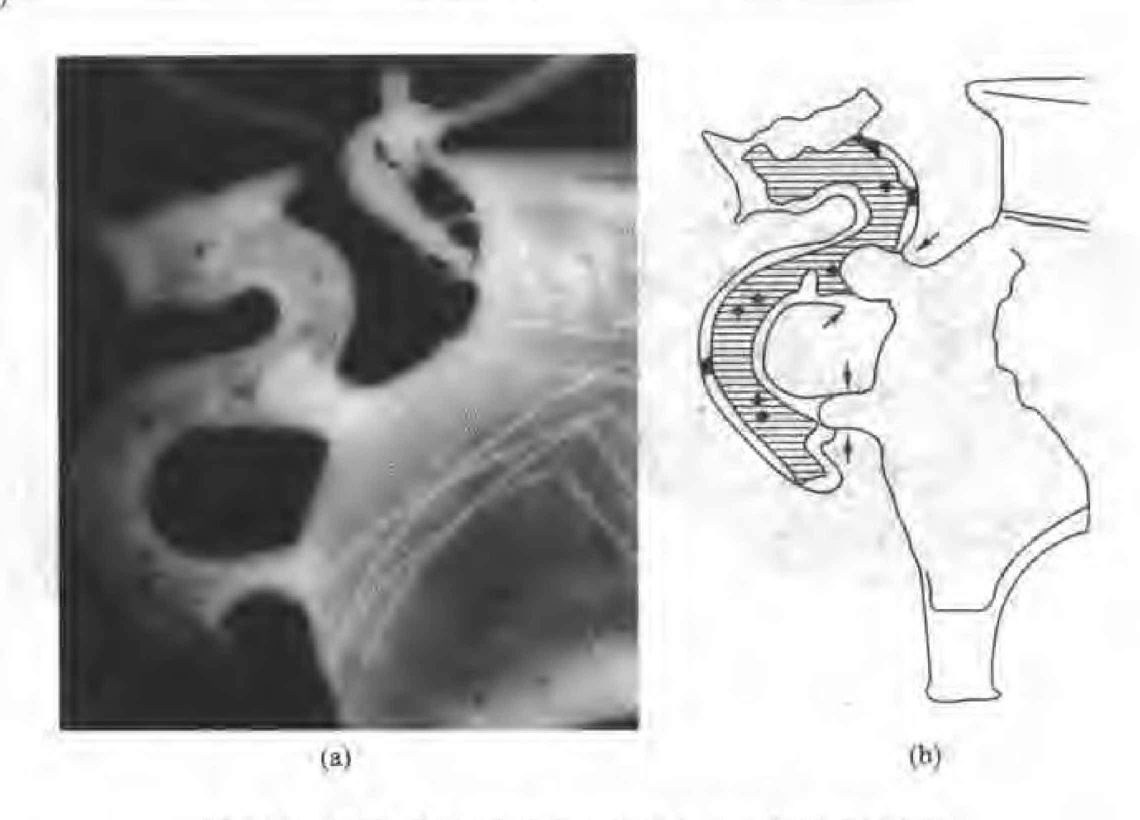


(a)　(b)

图 10.8　西周时期青铜盉及青铜盉盖部的 X 光片

(a) 铜盉　(b) 铜盉盖部的 X 光片

采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。



(a)　　(b)

图 10.9　器物鋬部与本体连接处的 X 光片及线描示意图
(a) X 光片　(b) 线描示意图
采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

对古代制陶工艺研究主要是用肉眼直接观察,陶俑的制作技术研究也是如此。用肉眼直接观察能够解决一些技术问题,但如果结合 X 光照相法,来显示泥条的痕迹、孔隙形貌以及沙粒形状,会使这一古代工艺技术的研究更加全面、更为科学。例如,我们可用 X 光照相分析方法了解陶俑内部形貌特征。图 10.10 左为汉代彩俑的正面 X 光片,显示出陶俑头部和身体中空;图 10.10 右为彩俑的侧面 X 光照片,中间发现一条沿垂直方向的裂隙,这些信息由于表面彩绘的存在而不能被直接观察到。由彩俑 X 光片提供的信息判断,俑应为前后两部分分别模制,之后粘接在一起,修整后入窑烧制,再打底施彩。

由此可见,表面直接观察与 X 光照相分析结合的研究方法能使我们更全面、更科学地了解古代工艺的特征。



(a)　　(b)

图 10.10　汉代陶俑正面及侧面的 X 光片
(a) 正面　(b) 侧面
采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

3. 反映文物的保存情况

不同材质的文物,由于非均质的特性,各个部位对 X 光能量的吸收明显不同,这样在 X 光片上可以清楚地显现出来。用 X 光照相方法反映文物保存状况,一般是在文物修复前进行。其目的是通过这种无损检测对文物的保存状况做出科学的评估,并为制定文物保护修复方案提供科学的依据。X 光照相方法可以反映被土锈覆盖的青铜器基体的锈蚀状况和裂隙分布,能够显示铁器的表层形貌和锈蚀深

度，能够确定陶俑彩绘层下的裂隙裂纹分布，发现其脆弱部位，能够明了揭取壁画破损错位情况，还可以探明可移动石刻文物风化深度和内部裂隙分布等。

陕西城固县文化馆所藏的商代铜罍。该器物出土时分为三块，未作任何处理，仅用环氧树脂直接粘接断裂部位，拼接复原，所以器表保持了出土时的状况——土锈泥垢包裹着整个器体。在完成青铜罍修复前的文字、照相及表面病变记录后，进行 X 光照相分析，图 10.11 是被土锈覆盖的三块青铜罍残块 X 光片之一。从图中 X 光片可以清楚地看到器物的裂隙裂纹和腐蚀程度及分布，修复师可以根据这些情况，直观地判断青铜器保存状况，制定科学可行的修复方案。



图 10.11 城固出土商代铜罍

采自杨军昌：《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》，《文物保护科学论文集》，文物出版社 2000 年版。

陕西长安县博物馆的汉代玉档铁剑同样被泥土和铁锈所覆盖（图10.12），铁剑的 X 光片清楚显示出剑体的锈蚀形貌，实际测量铁剑表面最大锈蚀厚度为 5 毫米。

在墓室揭取壁画的保护修复工作中，先用 X 照相方法检查其保存情况就显得更加重要。一般壁画的揭取过程大致是这样的：先对画面进行研究后分块画线，再进行画面的清理整修保护，上胶贴布烘干，然后用平铲进行铲切剥离，最后在壁画两侧垫上海绵用木板加固，运回实验室修复。古代壁画多用草拌泥制作，比较脆弱，容易折断，小块的部分在搬运过程中容易脱离原位，给壁画修复工作带来许多

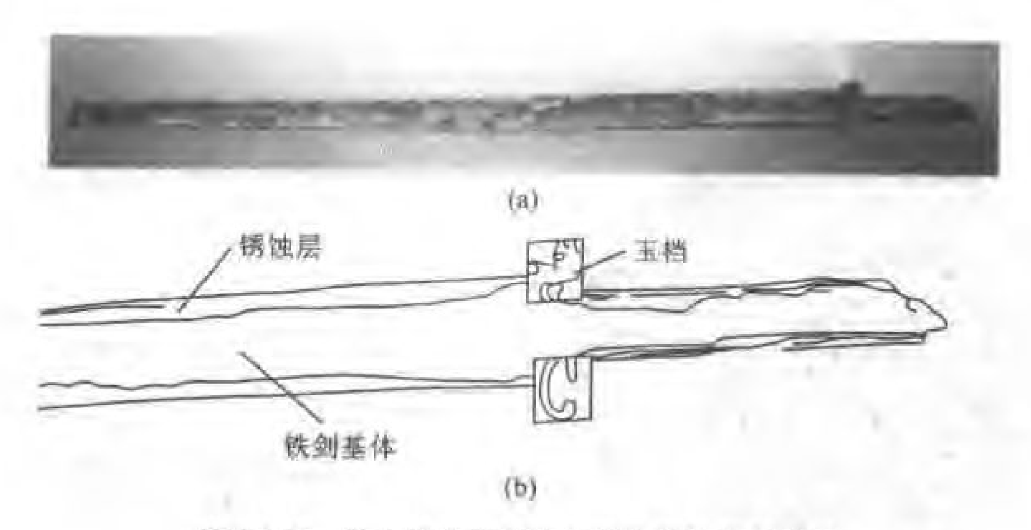


图 10.12 被土锈所覆盖的玉档铁剑及其 X 光片

(a) 玉档铁剑 (b) 玉档铁剑 X 光片

采自杨军昌:《X 光照相技术在文物及考古研究中的应用》,《文物保护科学论文集》,文物出版社 2000 年版。

困难和麻烦。如果在壁画修复前先对壁画拍摄 X 光片,壁画的破损错位情况一目了然,修复师就可以借助 X 光片,对小块壁画进行准确复位,以恢复历史艺术品的本来面目。

4. 文物真伪鉴定

在故宫博物院藏有一件父丁盘青铜,依据它的纹饰、造型,这件器物被定为春秋时代器物。但是盘的底部中间刻的八个钟鼎文,又具有商代特征,与整个盘子的风格不符(图 10.13—图 10.15)。



图 10.13 父丁盘的侧面照片

采自苗建明、宋朝忠:《青铜器的 X 射线无损检测技术》,《故宫博物院院刊》1990 年第 6 期,第 93—95 页。




图10.14 父丁盘的顶部



图10.15 父丁盘的底部

采自苗建明、宋朝忠:《青铜器的X射线无损检测技术》,《故宫博物院院刊》1990年第6期,第93—95页。

考古工作者用X光照相技术对盘子进行了检测,检测拍摄条件是,电压120千伏,电流2毫安,时间30秒,距离600毫米。拍摄的X光片子与普通照片附在后面,为看片方便把X光片洗成了照片,因此黑白反差结果与X光片相反(图10.16—图10.17)。

从反映盘内部结构的X光片可以看到,盘中间镶了块刻有铭文的青铜器残片,残片四周与盘衔接处的焊锡部分清晰可见。通过对检测结果的分析可以推断:第一,盘内铭文部分的铜质与整个盘的铜不同,铭文部分含铅锡量高于盘部分。如果说铭文具有商代的特征,那么刻有铭文的残片本身就可能是商代的器物残片。有关分析报告指出,商代中期对于铅的利用已较普遍,铅青铜、铅锡青铜所占比例甚高。第二,鉴于铭文部分与盘部分铜质不同这一事实,可以表明,两部分器物本不是一体,应是后人在春秋的蟠螭纹盘上镶焊了一块商代带铭文的青铜残片后作伪而成的。

同样对另一件有争议的龙虎有銎戈(图10.18)拍摄了X光片,检测条件:电压



图 10.16　父丁盘铭文

采自苗建明、宋朝忠:《青铜器的 X 射线无损检测技术》,《故宫博物院院刊》1990 年第 6 期,第 93—95 页。



图 10.17　父丁盘 X 光照片

采自苗建明、宋朝忠:《青铜器的 X 射线无损检测技术》,《故宫博物院院刊》1990 年第 6 期,第 93—95 页。

110 千伏，电流 2 毫安，时间 30 秒，距离 600 毫米。①



图 10.18 龙虎有銎戈

采自苗建明、宋朝忠：《青铜器的 X 射线无损检测技术》，《故宫博物院院刊》1990 年第 6 期，第 93—95 页。

通过对检测结果的分析，可以认定：第一，该器物确属矛、銎、刃三部分拼凑而成，三部分的焊接处及焊点从图 10.19 片子上可以明显看到；第二，三部分的铜质

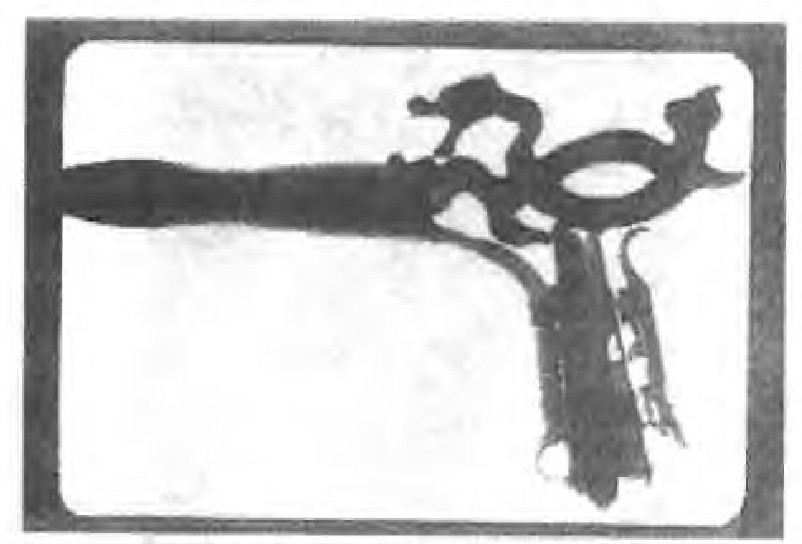


图 10.19 龙虎有銎戈的 X 光照片

采自苗建明、宋朝忠：《青铜器的 X 射线无损检测技术》，《故宫博物院院刊》1990 年第 6 期，第 93—95 页。

① 苗建明、宋朝忠：《青铜器的 X 射线无损检测技术》，《故宫博物院院刊》1990 年第 6 期。

有所不同,特别是两兽部分含铅、锡量明显高于另外两部分。

二、中子射线照相技术

中子射线照相法(ND)被广泛运用于生物、医药、电子元件、物质结构、土壤、食物、艺术品、飞机制造等各个领域的无损检测。中子的无损检测技术是在X光照相法的基础上发展起来的,其原理与X光照相法基本相同。1948年Kallmann开始了中子射线照相技术的研究,当时主要运用热中子作为激发源。1975年,O. H. Hilling首先将这种技术运用于文物研究中,通过对一件中国早期青铜礼器拍片研究发现,青铜礼器的一个足中有泥范芯存在。通过对印度的一尊大约公元800年的佛像研究发现,在佛像中存在有不同金属针和胶结物。P. Jtt和S. Sturman运用这种技术发现在埃及青铜猎鹰雕像的内部有骨头存在。

(一)原理及仪器

1. 原理及与X光照相法的比较

中子射线照相法的运用原理与X光照相法基本相同,两种检测方法的不同之处在于:

(1)中子射线照相法的激发源用的是热中于,而X光照相法用的是X射线。

(2)中子射线照相法可穿透较厚的物质,而X光照相法正相反,主要穿透较薄的物质。

(3)在对金属、有机物、陶瓷器进行检测时,X光照相法所需要的检测源的能量是不同的,因此,无法在同一张光片上观察到不同种类的物质;而中子射线照相法解决了这一问题,不同质地的物质均可在一张光片上显现。

2. 仪器设备

中于射线照相法的设备与X光照相法的基本相同(图10.20),由中子光束发生器、检测器、CCD摄像系统、数据收集器几部分组成。①

① Hironobu Unesaki, Takashi Hibiki. Evaluation of Scattered Neutron Component in Thermal Neutron Radiography Image; Influence of Scattered Neutrons and Unparallelness of Incident Neutron Beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1998(413):143 - 150.

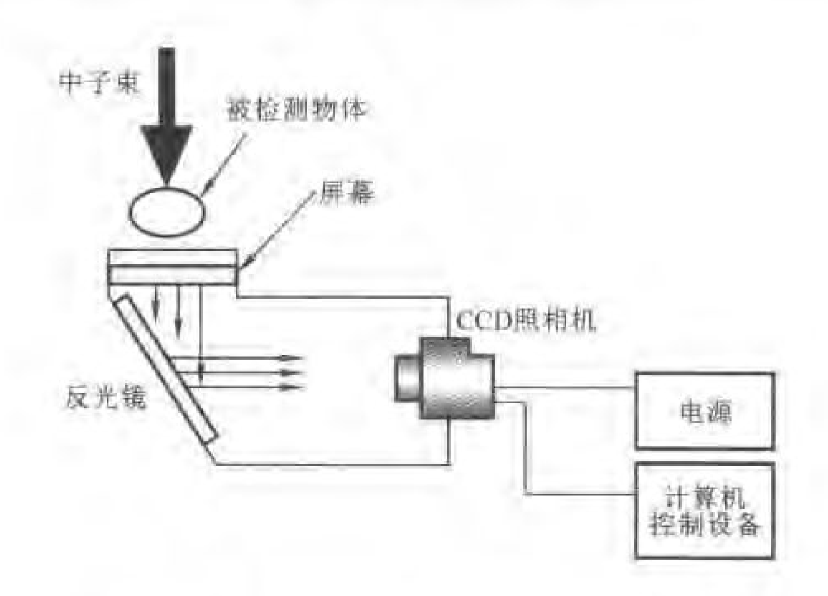


图 10.20 中子射线照相法设备组成示意图

Hironobu Unesaki, Takashi Hibiki. Evaluation of Scattered Neutron Component in Thermal Neutron Radiography Image: Influence of Scattered Neutrons and Unparallelness of Incident Neutron Beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1998(413): 143 – 150.

（二）中子射线照相技术在文物中的应用①

中子射线照相法可用于检测各类质地的文物，并可在同一张光片中显示不同质地的文物影像，这是中子射线照相法的最大优点。但是中子照相技术在显现被锈蚀覆盖的纹饰方面不如 X 光照相法清楚。

1. 出土青铜器中的佛箴言

有一直径为 12.1 厘米，高 29.5 厘米的千年青铜罐，盖是密封的。利用 KUR – E2 中子射线照相器对其进行检测时发现，铜器中存有其他物质，与卷成圈的纸张很为相似。将盖打开后发现，是写有经文的纸质箴言（图 10.21）。

2. 发掘出土的青铜瓶

Kembyo 青铜瓶出土于寺庙遗址，高 9.3 厘米，最大直径 5.1 厘米，发掘于

① Fumitake Masuzawa. Neutron Radiography Application for Buddhist Bronze Wares with Organic or Clay Objects and Statues.

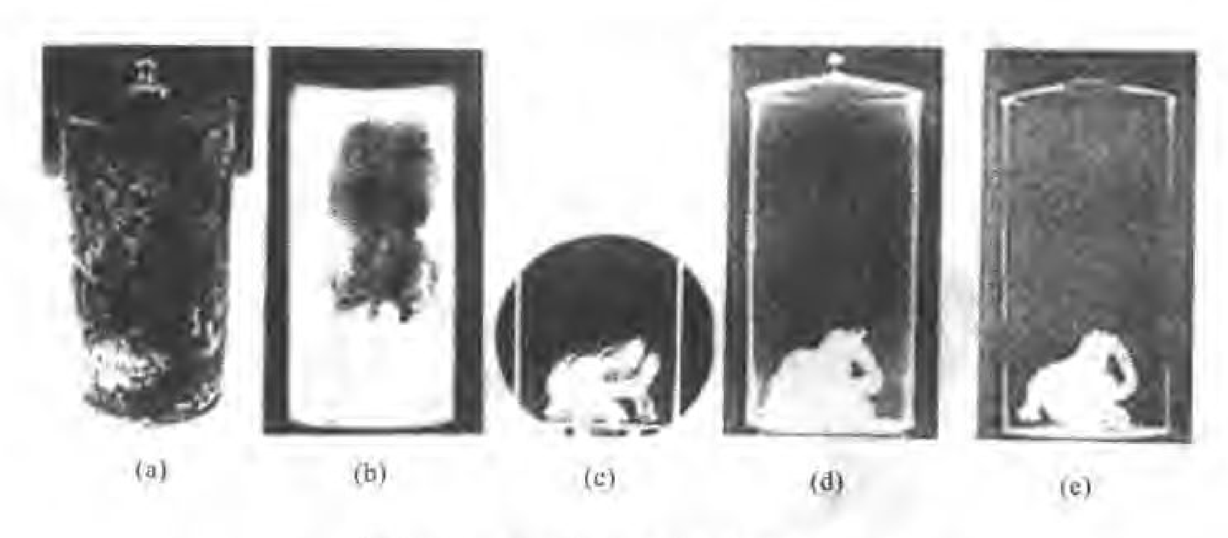


图 10.21 发掘的有佛龛盲的青铜罐

(a) 青铜罐 (b) X 光照片 (c) 中子射线照片(信噪比 = 100)

(d) 中子射线照片(信噪比 = 30) (e) 中子射线照片(信噪比 = 70)

Fumitake Masuzawa. Neutron Radiography Application for Buddhist Bronze Wares with Organic or Clay Objects and Statues.

1585 年,有盖,锈蚀严重,不容易打开,但在摇动中,发现里边似乎有东西。通过中子射线检测可以清楚地看到,在青铜瓶的内部有类似于小枝状的物质。同时还发现,青铜瓶的底部是和瓶身焊接而成的。一般情况下,埋在宗教遗址的文物,在文物的内部多放置有香、珍珠、玻璃珠、珠宝、药材、粮食等,用于祈求寺庙的平安。后来将此瓶盖打开后发现小枝状物质为香,另外在瓶中还发现有珍珠、玻璃珠、其他颗粒和粉末(图 10.22)。

3. 铸造的青铜雕像

青铜雕像高 19.6 厘米,据记载,雕像的足部是青铜雕像铸成后焊接上的,同时在青铜雕像中还放有其他合金。利用中子射线照相法可以看出:青铜雕像膝盖处较薄,而青铜器的铸造部件很厚;在青铜雕像中仍留有绿砂范;在雕像的中部有一条 3 毫米的垂直的线(图 10.23)和 1 毫米的垂直线;另外在青铜雕像的臀部上有两条交叉线,中部的垂直线是脊柱的范,臀部的垂直线是镶在青铜器内的钉子,钉子估计是铁质的。

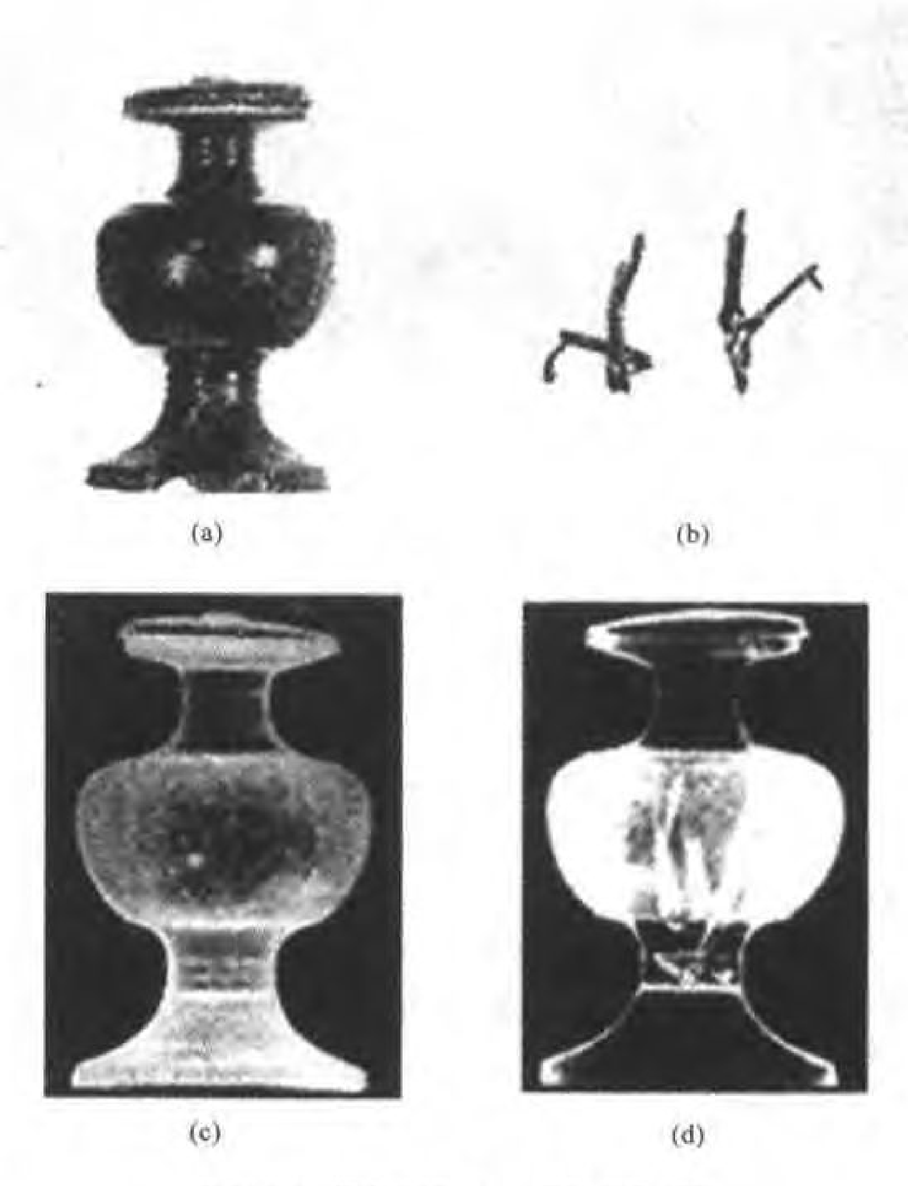


图 10.22 发掘于 Kembyo 遗址的青铜瓶
(a) 青铜瓶 (b) 从瓶中取出的有机物
(c) 瓶的 X 光照片 (d) 瓶的中子射线照片

Fumitake Masuzawa. Neutron Radiography Application for Buddhist Bronze Wares with Organic or Clay Objects and Statues.

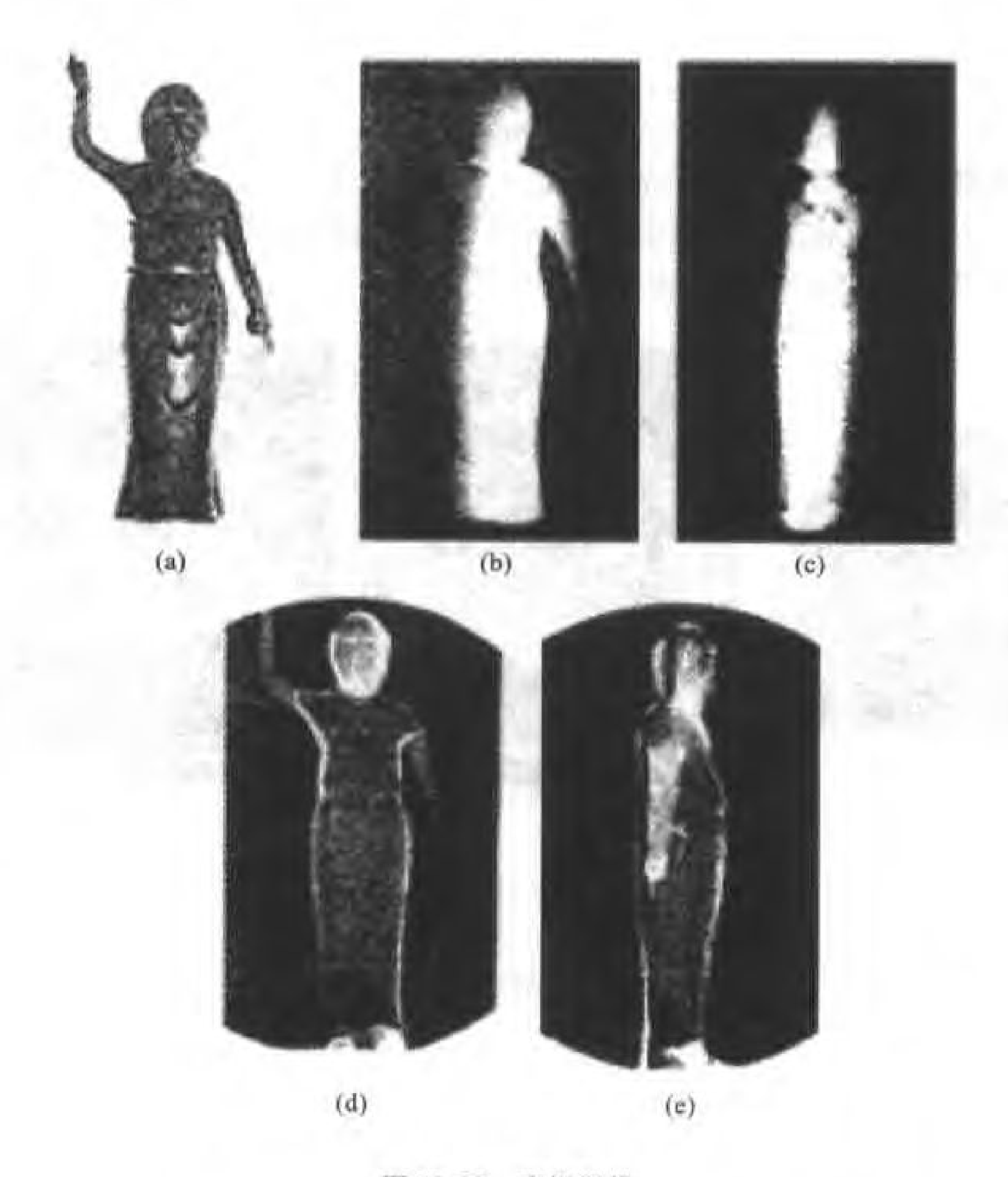


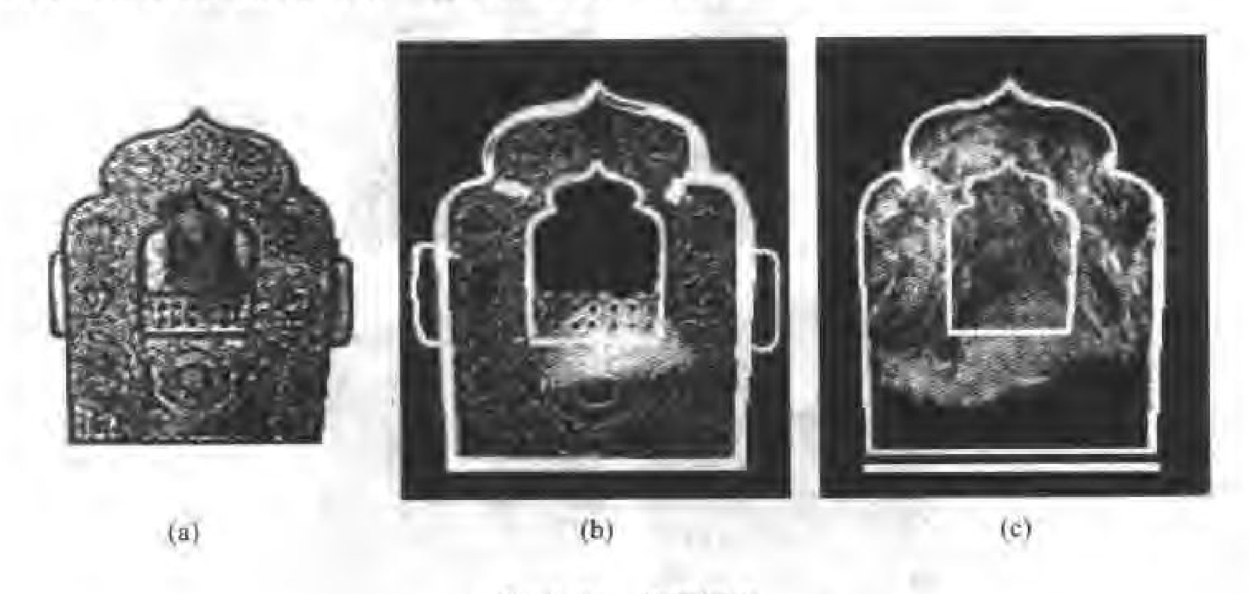
图 10.23　青铜塑像

（a）青铜像　（b）X 光照片　（c）X 光照片　（d）中子射线照片（前）
（e）中子射线照片（后）

Fumitake Masuzawa. Neutron Radiography Application for Buddhist Bronze Wares with Organic or Clay Objects and Statues.

4. 西藏铜盒

西藏末上釉的佛教雕像藏于青铜盒中，青铜盒的四壁装有玻璃(玻璃为后装的)。估计在佛雕像外包有佛经。通过X光照相法可以清楚地看到青铜盒的轮廓，盒中放有较厚的盘，但佛经形状不可确定。利用中子射线照相技术所得到的铜盒中佛雕像的影像要比利用X光照相技术得到的影像模糊，但是通过中子射线照相技术可以清楚地观察到佛经是折叠的丝织品，呈卷状放在铜盒内，放置时与铜盒的顶部以及四周都保持有一定的距离(图10.24)。



(a) (b) (c)

图10.24 西藏铜盒

(a) 西藏铜盒 (b) X光照片 (c) 中子射线照片

Fumitake Masuzawa. Neutron Radiography Application for Buddhist Bronze Wares with Organic or Clay Objects and Statues.

中子摄像技术在国外已被广泛地运用于文物研究上，但国内却鲜见报道。随着科技的快速发展，中子摄像技术已经日渐成熟，仪器设备也开始向小型化发展。特别是对于那些用X光摄像技术无法探测的有机物体，可以通过这种技术获得详细的信息。

三、红外成像技术

红外成像技术于20世纪30年代就已经用于对古代文物和艺术品的鉴别。但

由于红外摄影操作比较复杂,在实际应用中难以推广。随着科学技术的发展,人们发现红外技术与电视摄像结合在一起的红外成像技术,比红外摄影要方便得多,因此受到文物工作者的重视。国外应用红外成像技术来检测油画及艺术品,以研究画家创作技法的演变及获取隐藏于覆盖层下的损坏、剥落或修复情况信息。我国在20世纪70年代,由上海新跃仪器厂和上海博物馆合作,应用这一技术对受污损的宋代绢画《卧猫》进行了观察,受污损的部分能清晰地在荧光屏上显示出来。

(一)原理及方法

1. 红外摄像的原理

红外线在自然界到处都有。除太阳光辐射含有红外线之外,凡温度高于0 K的所有物体,例如火炉、电灯、暖气设备等都能发射红外线,其波长在760~2 500微米之间。红外线最大的特点是人眼看不见,但具有被物质反射、折射和吸收的特性,而且不同的物质对不同波长红外线的反射、折射和吸收各不相同。当红外线源产生的红外线通过空气照射到被检测的物体上时,与被照射物体相互作用,产生反射、折射和吸收,形成不同波长和不同强弱的红外线。经滤光镜把不需要的可见光和红外线滤掉,需要的红外线射到光学镜头上,经光学镜头聚焦,成像在红外摄像管靶面上,通过靶面材料的光电效应,把红外线的图像变成电信号,再经过摄像机电路对电信号处理,变成全电视信号,送给监视器,又由监视器把信号转变成光信号,便可看到需要检测的物体的红外图像了。为了便于记录和整理资料,可用照相机对监视器上的图像拍照,也可以直接从摄像机的输出端给录像机一个全电视信号,录像机就可通过录像带把红外摄像的全部结果记录下来。图10.25是红外摄像示意图。①

2. 方法

红外光源的波长分别为0.85微米及0.92微米两种单色光源以适应不同需要。也可使用白炽灯。白炽灯发光的波长范围约在0.4~2.5微米内,因此具有相当大的红外成分。滤光片用特制的玻璃制成,对可见光不透明,对波长为1~2微米的红外光的透射率为0.4。使用滤光片的目的是不让可见光进入摄像头内,以提高红外信号的信噪比。CCD摄像头的分辨率为600线低照度(0.01勒)的黑白

① 王勉、奚三彩:《红外电视及其在文物检测中的应用》,《东南文物》1993年第6期。

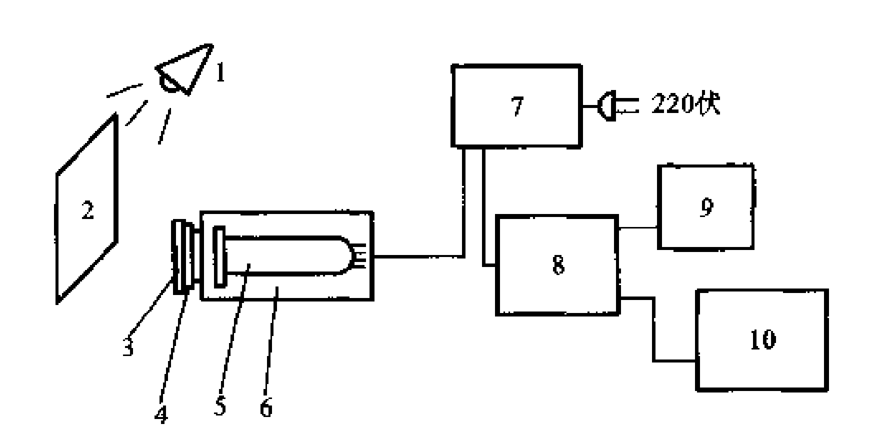


图 10.25　红外摄像示意图

1. 红外线源　2. 被检测的物体　3. 红外滤光片　4. 光学镜头　5. 红外摄像管　6. 红外摄像机电路　7. 电源控制器　8. 图像监视器　9. 照相机　10. 录像机

采自王勉、奚三彩:《红外电视及其在文物检测中的应用》,《东南文物》1993 年第 6 期。

摄像头,输出信号为 PAL 制式的视频复合信号。因计算机屏幕的显示原理与电视不同,所以,信号在送入计算机之前先经过专用的图像转换卡转换成计算机能接受的制式。视频的捕获分辨率为 640×480。

(二) 红外摄像技术在文物中的应用①

1. 被墨水沾污的图片的复现

图 10.26(a)是一幅明代陈洪绶所绘春风蝴蝶图卷(复制品)的局部,其中右上部的花瓣及左下部的蝴蝶被墨水沾污,肉眼已看不清楚其细迹。图 10.26(b)为用红外摄像机摄得的图像,可以看出被沾污部分已清楚地显示出来,从而为修复提供了有价值的信息。

2. 炭化的出土简牍字迹的识读

图 10.27(a)是一幅汉代木牍的图片,由于该木牍埋于地下已有千余年,出土

① 许志正、裘元勋:《红外成像技术在文物中的应用》,《文物保护与考古科学》1998 年第 2 期,第 22—25 页。

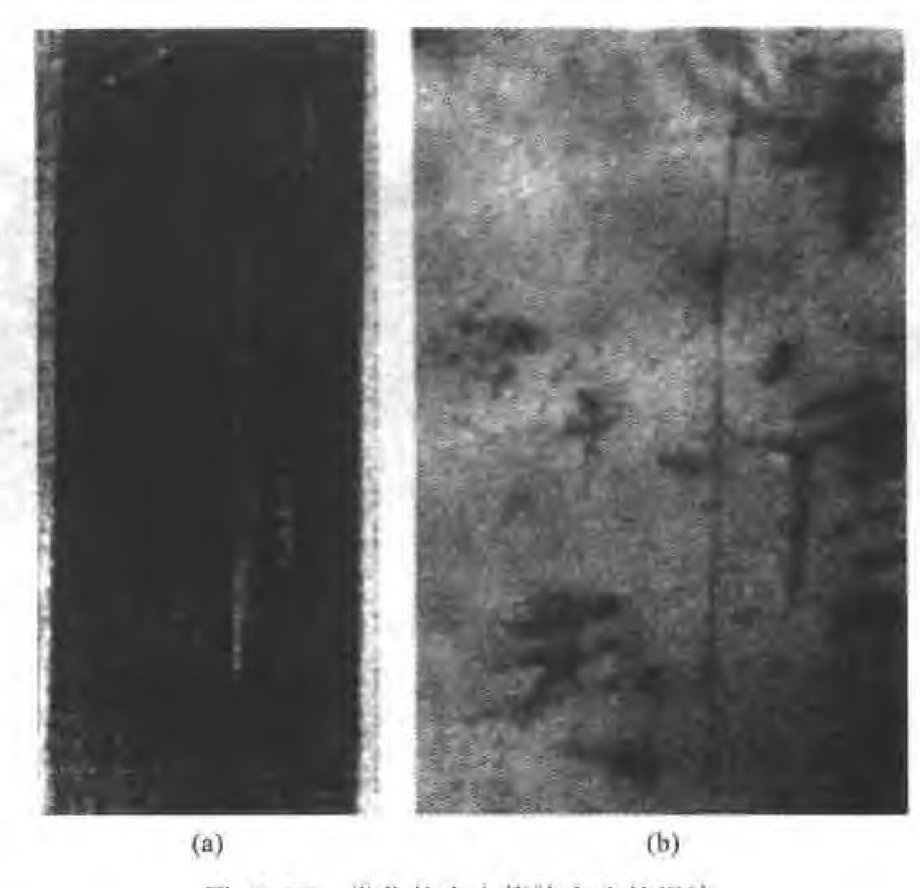


(a) (b)

图 10.26 墨水沾污图的复现

(a) 左下的蝴蝶及右上的花瓣被墨水沾污,已不能看清 (b) 在红外线照射下,沾污部分细迹清晰可辨

采自许志正、裘元勋:《红外成像技术在文物中的应用》,《文物保护与考古科学》1998 年第 2 期,第 22—25 页。



(a) (b)

图 10.27 炭化的出土简牍字迹的识读

(a) 埋藏于地下的简牍,炭化发黑,上面的字迹无法识别 (b) 红外摄像获得的图像并经过计算机作灰度处理

采自许志正、裘元勋:《红外成像技术在文物中的应用》,《文物保护与考古科学》1998 年第 2 期,第 22—25 页。

时已经炭化发黑，上面的字迹已不可辨认。通过红外成像技术摄得的图像，经计算机技术作灰度调整处理后，图 10.27(b)上面的字迹清晰可辨。

考古工作者还利用这种技术对著名的"尹湾简牍"和"大庸汉简"上模糊的字迹进行了识读，使过去肉眼无法辨识的五百多个字得以确认，也纠正了过去因字迹模糊而释错的许多字，为正确理解古代文献起了积极的作用。

3. 邮票的真假鉴别

1979 年发行的编号为 J42 的邮票小型张加盖"中华人民共和国邮票展览"11 个字，如今价值非凡，因此有些不肖之徒造假牟利。由于这些字非常小，必须用高倍放大镜才能看清。将红外成像技术摄得的两张邮票的图像放在一起作同屏比较，真伪一目了然(图 10.28)。

随着科技的发展，红外摄像的设备也日趋小型化。便携式红外摄像设备的产生，使之能更为方便地用于文物检测的各个方面，特别是用于石窟寺内烟熏壁画的检测。



(a)　(b)

图 10.28　真假邮票的鉴别

(a) 伪造邮票上的"和"　(b) 真票邮票上的"和"

采自许志正、裘元勋：《红外成像技术在文物中的应用》，《文物保护与考古科学》1998 年第 2 期，第 22—25 页。

第三节 文物的显微分析研究

一、光学显微镜

(一) 体视显微镜

体视显微镜是分析鉴定和保护文物工作最常用的分析工具之一。由于其结构简单、价格便宜、实用性强、操作简单等特点，在多数博物馆的保护实验室中都有配备。通常体视显微镜由物镜、目镜、镜筒、载物台和一个附加的照明灯等部分构成，可通过旋转物镜调节放大倍数。体视显微镜的放大倍数一般为 14 ~ 200 倍不等，一些较好的显微镜还配有照相系统，可获得被观察物体的显微放大照片。图 10.29 是日本尼康公司生产的型号为 SMZ1500 型体视显微镜。

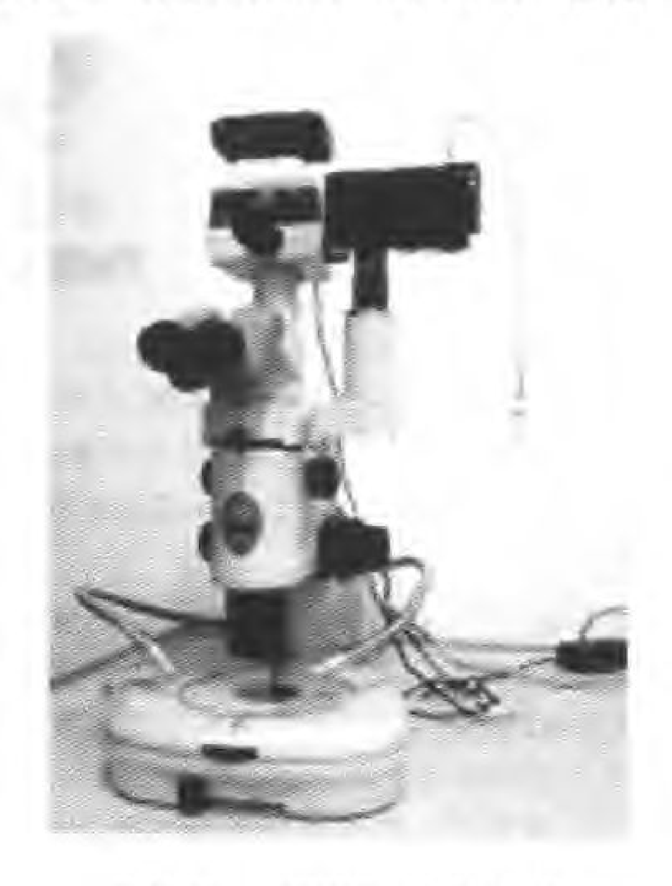


图 10.29 SMZ1500 型体视显微镜

在对古代文物结构和工艺的研究中，显微结构分析是一种不可或缺的方法和手段，它提供的显微结构信息，可以为人们提供直观的、细微的观察。体视显微镜可用于观察纸张、丝绸、陶瓷等各类文物，是文物研究的理想工具之一。

（二）偏光显微镜

偏光显微镜是依据波动光学的原理，观察和精密测定标本细节，或根据透明物体改变光束的物理参数，以此判别物质结构的一种岩相显微镜。偏光显微镜的放大倍数一般为40～400不等。图10.30是XPT－6型偏光显微镜。

偏光显微镜的成像原理是在光路中插入两个偏光镜。一个在载物台下方，称为下偏光镜，用来产生偏光，故又称起偏镜，其作用是使入射光分解成振动方向互相垂直的两条线偏振光，其中一条被全反射，另一条则入射；另一个在载物台上方的镜筒内，称为上偏光镜，它被用来检查偏光的存在，故又称检偏镜。凡装有两个偏光镜，而且使偏振光振动方向互相垂直的一对偏光镜称为正交偏光镜。正交偏光镜间无样品或有各向同性（立方晶体）的样品时，视域完全黑暗。当有各向异性样品时，光波入射时发生双折射，再通过偏振光的相互干涉获得结晶物的衬度。



图10.30 XPT－6型偏光显微镜

偏光显微镜在文物研究方面主要用于对古代颜料、丝绸、陶瓷等各类文物的鉴定，使用偏光显微镜时，先将文物样品制成可供观察用的薄片，然后在镜下根据不同矿物晶体在偏振光透过时具有不同的光学性质来鉴定矿物类型。

（三）金相显微镜

金相显微镜是进行金相分析（金属显微组织）的最基本的仪器之一。所谓金相分析是指通过对金属显微组织的分析，来研究金属中合金生成、冶炼、浇铸以及加工工艺等信息。金相显微镜的种类很多，但基本原理大致相同。金相显微镜的构造与偏光显微镜相似，所不同的是金相显微镜增加了入射光附件，可通过垂直的入射光束照射到样品表面，观察样品的微观形态。图10.31、图10.32分别是国产4x型金相显微镜的光学系统和机械结构的示意图。

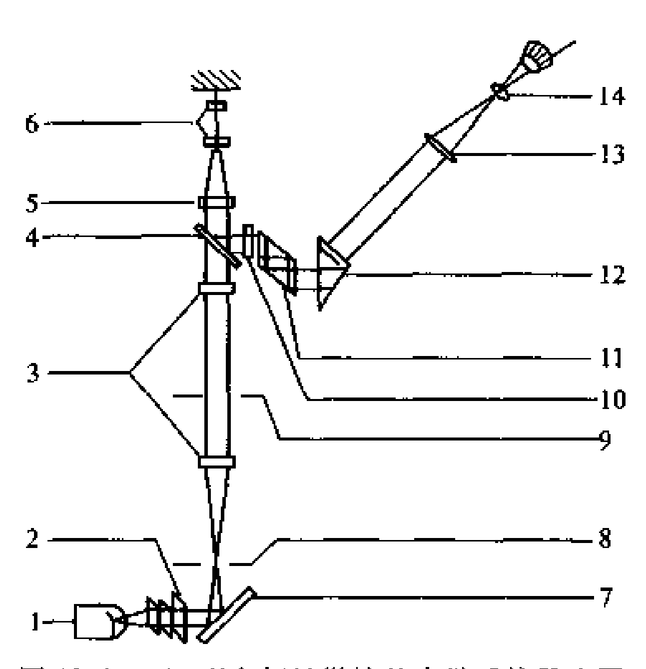


图 10.31　4x 型金相显微镜的光学系统示意图

1. 灯泡　2. 聚光镜组(一)　3. 聚光镜组(二)　4. 半反射镜　5. 辅助透镜(一)　6. 物镜组　7. 反光镜　8. 孔径光阑　9. 视场光阑　10. 辅助透镜(二)　11、12. 棱镜　13. 场镜　14 目镜

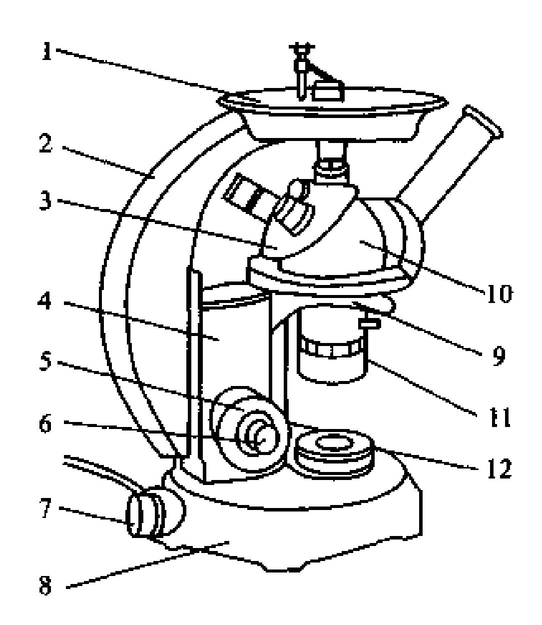


图 10.32　4x 型金相显微镜的机械结构示意图

1. 载物台　2. 镜架　3. 物镜转换器　4. 微动座　5. 粗动调焦手轮　6. 微动调焦手轮　7. 照明装置　8. 底座　9. 平台托架　10. 镜头组　11. 视场光阑　12. 孔径光阑

金相分析开始于20世纪60年代,在考古学中主要是对古代金属文物的加工工艺、冶炼铸造工艺的研究。使用金相显微镜分析时,一般是用金属文物的残片,制成显微样片,然后放在金相显微镜下直接观察或用 $FeCl_3$ 的乙醇溶液侵蚀后观察,并可以摄取照片。金相组织分析是研究古代金属遗物的基本内容和重要方法。我国学者利用金相分析法对我国不同时期的铁器作了分析,并对古冶铁遗址进行了考察,结果表明在中国古代钢铁业中,铸铁和生铁制钢一直是主要方法;铸铁脱碳钢、炒钢、灌钢工艺是中国古代炼钢技术中的重大成就;中国的冶金技术在明代中叶以前一直居于世界领先水平。

二、电子显微镜

(一) 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,SEM),简称扫描电镜,是一种分辨率极高的精密仪器。它于1965年开始问世,目前广泛应用于各个自然科学领域。扫描电子显微镜堪称20世纪最伟大的发明之一,它有极高的实用价值。

扫描电子显微镜具有许多的优点,首先它的分辨率极高,扫描电子显微镜的二次电子的成像分辨率可达 $6\times10^{-6}\sim1\times10^{-5}$ 毫米,最佳可达 3×10^{-6} 毫米,而普通人眼为0.1~0.2毫米,光学显微镜的分辨率为 $0.1\times10^{-3}\sim0.2\times10^{-3}$ 毫米。其次,扫描电子显微镜的放大倍数范围很大,从20~100 000倍连续可调。还有,观察样品表面图像的景深大,富有立体感。随着扫描电子显微镜的不断改进,综合性的分析功能加强。如与X射线能谱仪配接,可在观察形貌的同时进行微区成分分析;配有光学显微镜和单色仪等附件时,可观察阴极荧光图像和进行阴极荧光光谱分析等。因此,它可同时具有透射电镜、电子探针、X射线显微分析、电子衍射等功能。扫描电镜已成为一种快速、直观、综合的现代化分析仪器①。

1. 扫描电子显微镜的原理与成像

当入射电子束轰击到样品上时,运动电子与物质发生相互作用,这个过程复杂,并产生许多信息如二次电子、背散射电子、俄歇电子、特征X射线、透射电子、吸收电子、阴极荧光。这些信息反映了样品本身不同的物理化学性质。这些信息

① 李士、秦广雍:《现代实验技术在考古学中的应用》,科学出版社1991年版,第112页。

通过转变成放大的电信号，成像信号可以是二次电子、背散射电子或吸收电子，其中二次电子是最主要的成像信号，在荧光屏上以二维图像显示或记录下来。扫描电子显微镜的示意图，如图 10.33 所示。

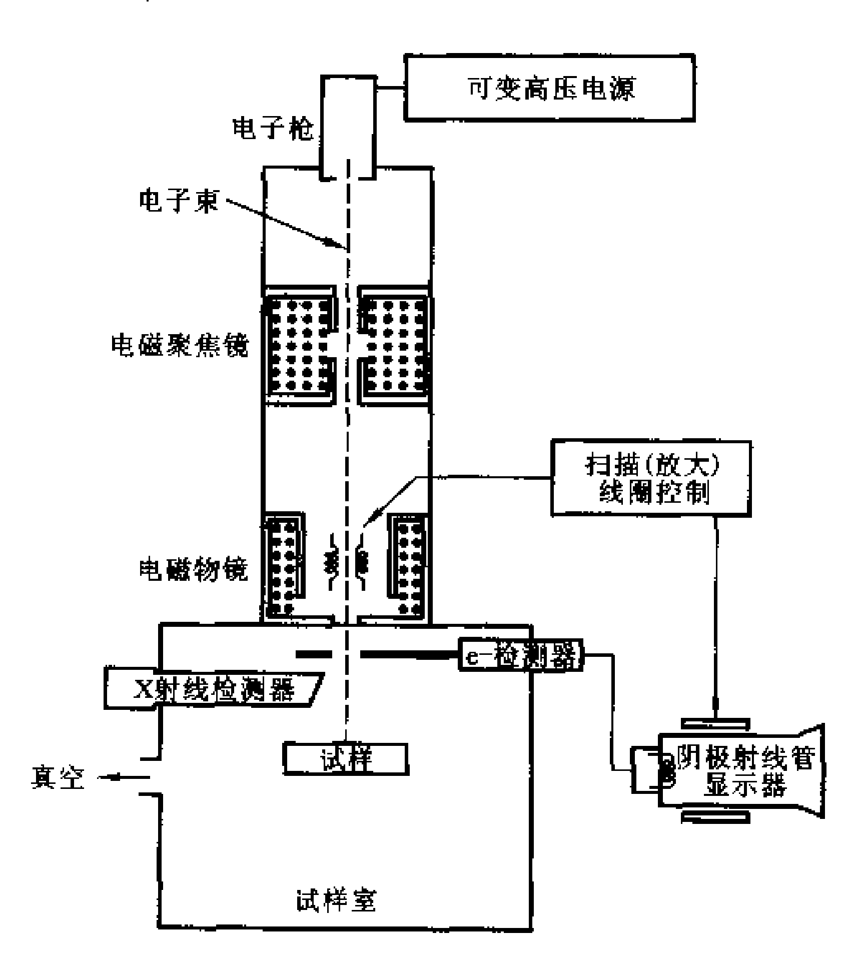


图 10.33 扫描电子显微镜示意图

扫描电子显微镜的成像过程为：由电子枪发射一定能量的电子，以其交叉斑作为电子源，经二级聚光镜及物镜的缩小形成具有一定能量、一定束流强度和束斑直径的微细电子束，在扫描线圈驱动下，于试样表面按一定时间、空间顺序作栅网式扫描。聚焦电子束与试样相互作用，产生二次电子发射（以及其他物理信号），二次电子发射量随试样表面形貌面变化。二次电子信号被探测器收集转换成电信号，经视频放大后输入到显像管栅极，调制与入射电子束同步扫描的显像管亮度，

得到反映试样表面形貌的二次电子像。

尽管电子显微镜的操作简便,但在样品的选择上有一定要求:

(1)样品必须是固体(块状、粉末状均可),样品表面要干净,如含水的样品须先进行脱水处理,并要防止样品因脱水面变形,表面污染的则要清洗。

(2)样品的尺寸以能放入样品台上为宜,太大的要切割取样。

(3)样品要有良好的导电性,对于导电性差的样品如陶瓷、植物、编织品等,在电子束作用下会产生电荷堆积,影响人射电子束斑和样品发射的二次电子运动轨迹,使图像质量下降。因此这类试样在观察前要喷镀导电层进行处理,通常采用二次电子发射系数较高的金银或碳膜做导电层,膜厚控制在20纳米左右。

2. 扫描电子显微镜的应用

扫描电子显微镜可以对样品进行图像观察和晶体结构分析。扫描电子显微镜可以研究古陶瓷的表面形状、晶粒大小及相互结合的状况,也可以研究陶瓷内气孔的形状分布、玻璃化程度并进而推断其烧结温度;研究金属文物的微观结构和金属文物腐蚀的原因①;还可以为古代植物、石器工具、兽骨头和牙齿、古代衣物提供详细的立体图像②等。但实际工作中,考古工作者常常将之与其他方法相结合,互相验证,一般扫描电子显微镜与电子微探针共用,或者与X射线衍射、原子吸收、质谱等手段配合。

(二)透射电子显微镜

透射电子显微镜是以波长很短的电子束做照明源,用电磁透镜聚焦成像的一种具有高分辨本领、高放大倍数的电子光学仪器。其主要特点是,测试的样品要求厚度极薄(几十纳米),以便使电子束透过样品。

透射电子显微镜由电子光学系统、真空系统和供电控制系统三大部分组成。透射电子显微镜中,物镜、中间镜、透镜是以积木方式成像,即上一透镜的像就是下一透镜成像时的物,也就是说,上一透镜的像平面就是下一透镜的物平面,这样才能保证经过连续放大的最终像是一个清晰的像。透镜成像可分为两个过程,一是平行电子束与样品作用产生衍射束经透镜聚焦后形成各级衍射谱,即物的信息通过衍射谱呈现出来。二是各级衍射谱发出的波通过干涉重新在像面上

① 范崇正、胡克良、吴佑实:《文物保护与考古科学》,1996年第1期第17页。

② 王增林:《扫描电子显微镜在考古中的应用简介》,《考古》1994年第11期。

形成反映样品的特征的像。透射电子显微镜主要是根据被测样品的电子衍射图来鉴定样品的。所获得的衍射花样，对于多晶为一系列半径不同的同心衍射环；对单晶则是一系列规则排列的衍射斑点。图 10.34 和图 10.35 分别是透射电镜

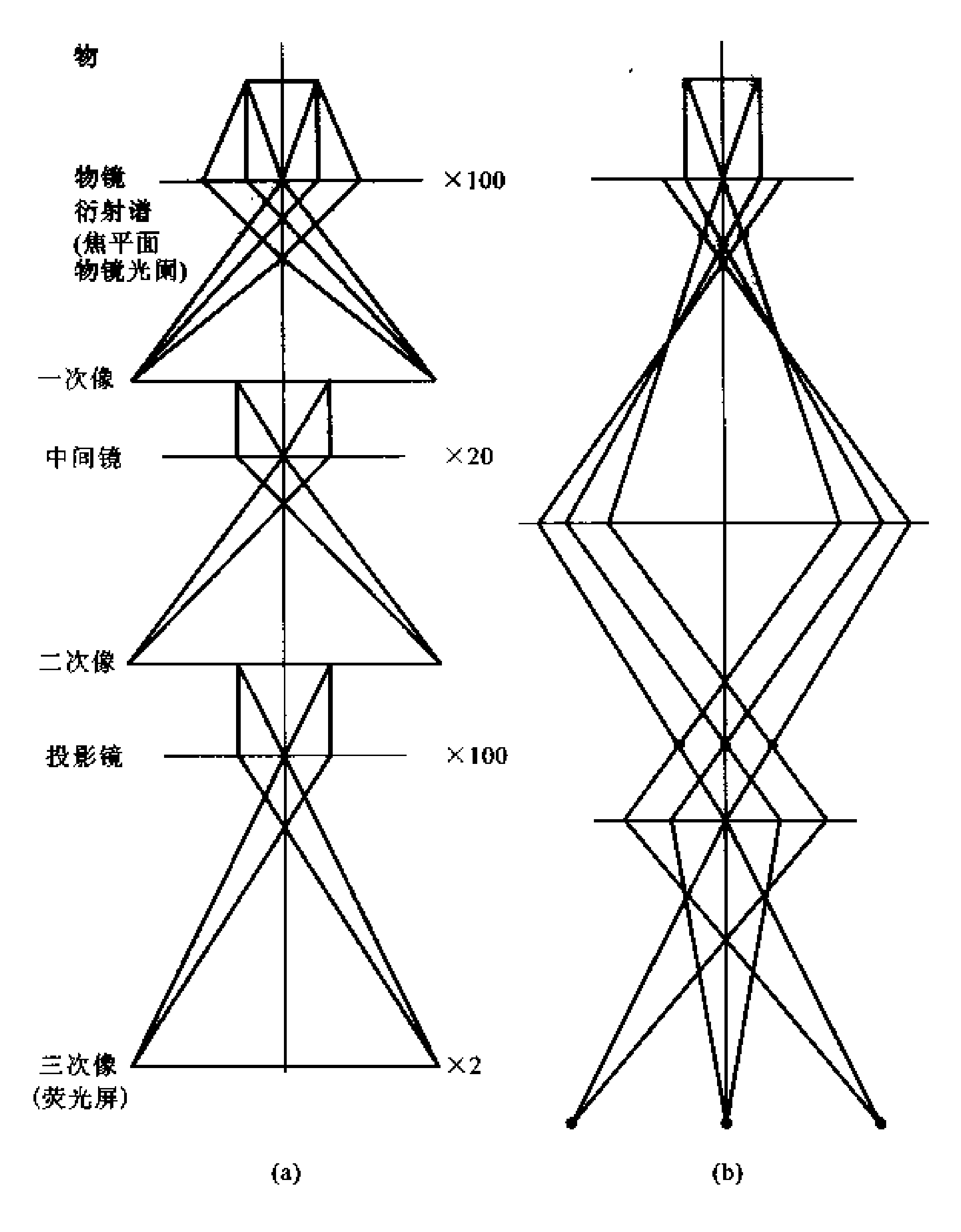


图 10.34　透射电镜的成像方式
(a) 显微成像　(b) 衍射花样成像

的两种成像方式以及金蒸发膜的多晶和钢中 $Mo_{23}C_6$ 单晶的电子衍射花样的图像。




图 10.35 金蒸发膜的多晶和钢中 $Mo_{23}C_6$ 单晶的电子衍射花样

用于透射电镜观察试样的要求是：它的上下底面应该大致平行，厚度应在 50～500 纳米，表面清洁。透射电子显微镜在文物分析中的应用主要是在文物材质分析以及保护材料与文物间的反应考察等。

第四节 文物组成的成分、结构分析及制作工艺研究

一、文物组成成分分析

成分分析是指对样品中所含元素种类及含量的一种分析。根据样品中元素含量的多少一般可分为三类：第一种是常量元素分析，即主要元素分析，一般其含量大于或等于 2%。可以人为控制，是制作时人们有意加入的。第二种是微量元素分析，元素含量一般介于 0.1%～2%，不受人工配方控制，反映器物的原料产地特征（如瓷器的胎、釉的本质特征）。第三种是痕量元素分析，其含量低于 0.1%，通常用 ppm 来表示含量单位，这些元素古代人无法控制，一般由元素的产地所决定，因而痕量元素多用于文物起源方面的研究。

不同种类文物的样品所采取的分析方法不同。在选取分析方法之前须对研究

对象作一调查,看看考古遗存的材质、形状和体积等,如材质是陶瓷、金属、玉石还是其他;是测表面还是测内部,同时要结合考古的所有信息,对被测对象有何要求;是测其人为因素还是测其产地。必要时要采用多种分析手段,因为每种分析方法都有其优缺点,在使用多种分析方法时要考虑10%左右的差别,以共同点、一致性为主。

测定成分的方法很多,因篇幅所限,在本文中不能一一详述,仅就目前在考古学中常用的几种成分分析方法作一简要介绍。

(一)原子吸收光谱

原子吸收光谱(AAS),又称原子吸收分光光度法,是利用原子吸收分光光度计测量待测元素的基态原子对其特征谱线的吸收程度来确定物质元素种类和含量的分析方法,它是1955年首次建立的一种仪器分析方法。1954年,世界上第一台原子吸收光谱计诞生,但当时还比较落后,只能分析30余种元素。在20世纪60年代,原子吸收光谱得到迅速发展。1961年,非火焰原子吸收光谱仪出现。1968年,又产生了石墨原子吸收光谱仪。后来随着新技术和计算机的引进,以及联用技术的发展,原子吸收光谱自动化程度、测定精度都得到很大的提高,应用领域也更加拓展。大约在20世纪70年代初期,原子吸收光谱法被应于考古学中,成为文物考古研究中的一种重要的成分分析方法。

任何一种元素的原于都有一系列确定的能量状态,每一个能量状态称为一个能级。原子吸收是气态自由原子对同种原子辐射的特征光谱线产生的自吸现象。原子吸收光谱分析是基于从光源辐射出待测元素的特征光谱线通过样品的蒸气时,被蒸气中待测元素的基态原子所吸收,由辐射光谱线强度减弱的程度,来求出样品中待测元素的含量。

原子吸收光谱分析法具有非常突出的优点,它具有灵敏度高(可达10^{-13}~10^{-19}克),更适宜作痕量分析;选择性好,抗干扰能力强,重现性好;测定元素种类多,凡是能够有效地转化成自由基态原子并能获得共振辐射光源的元素,都可以应用原子吸收光谱法来直接测定;设备简单,所需样品量少。其缺点表现为:测定高温元素的灵敏度尚不令人满意;测定每个元素都需要特定的元素灯;标准曲线的线性范围窄;虽然相对于其他光谱分析法来说干扰小,但样品基体复杂时,可存在干扰,有时还比较严重,需要在测试中设法消除;只适用于成分已知的样品,对于未知

成分的样品，只能分析主观要求分析的元素。

原子吸收光谱仪由单色锐线辐射源、试样原子化器单色仪、光电转换器及相应的检测装置组成①。工作时，将样品导入高温炉或化学燃烧火焰中，通过加热和化学反应使样品原子化，通过分光系统把待测谱线和其他谱线分开。再经检测系统进入记录器和指示器，利用连接的计算机进行计算。

国外已有许多人用此法对古代陶器、金银器乃至黑曜岩、燧石进行了分析。Hatcher 等人用原子吸收光谱法分析得出古希腊时代的黑釉陶器是由两处不同的黏土制作的，而陶器(包括有装饰和无装饰)的黏土来源是同一个地方的，云母质地的陶器也来源于几处黏土。Hatcher 的研究表明，许多陶器构造、外形相似，但其用料并非完全相同。我国和外国学者共同用原子吸收光谱仪就我国唐宋时期的陶片进行了分析，测出了九种主元素和微量元素，结果表明不同的窑址其化学构成不同②。

(二) 原子发射光谱

基态原子获得能量而使电子从低能级跃迁到较高的能级上，使电子呈激发态。这种处于激发态的电子很不稳定，约经 10^{-8} 秒，电子又从较高能级将多余的能量以光的形式放出，跃迁到较低能级或回到基态。原子发射光谱分析法就是研究原子由激发态回到基态过程中发射出的光的性质而建立起来的分析方法。原子发射的光谱线的波长取决于跃迁前后两个能级间的能量差，不同元素的原子发射出的光谱线是不同的，每一种元素都有自己的特征光谱。根据原子发射出的光谱线的波长或频率，就可以知道是何种元素发射的，这就是发射光谱定性分析的依据。而这些特征线的强度或谱线出现的数目与试样中某元素的含量有一定的关系，根据这种关系就可进行定量分析。

由于使用激发光源的不同，原子发射光谱有激光显微发射光谱、电感耦合等离子体发射光谱等种类，目前，使用较多的是电感耦合等离子体发射光谱，其特点是：灵敏度非常高，可达 0.1 ~ 10 ppm、误差小(可控制在 1% ~ 2% 范围内)、分析速度快，同时可对多元素检测，无需制备样品，属近于或无损分析。由子发射光谱分析

① 李安模、魏继中：《原子吸收及原子荧光光谱分析》，科学出版社 2000 年版，第 60 页。

② Pollard A M, Hatcher H. The Chemical Analysis of Oriental Ceramic Body Compositions; Part 1: Wares from North China, Archaeometry, 1994, 36(1): 41 – 62.

是一种相对的分析法，必须要制备标样，标样没有状态限制，但其元素含量、组织结构与测样要一致。其操作简单，等离子体为激发光源，经过蒸发、激发作用于样品上，通过计算机、摄谱仪等自动程序的处理就可记录下样品的光谱特征并进行定量定性分析，确定元素含量。但是原子发射光谱分析法也存在一些不足之处：雾化进样装置效率低；雾化器易堵塞，造成工作不稳定；氩气消耗量大，维持费用高；某些元素的灵敏度还不够高。

目前考古学中用原子发射光谱法来分析陶瓷器、金属器中的常量、微量、痕量成分，进而判定其产地、制作工艺，以及古代人生活的某些情况。国外有学者利用原子发射光谱仪研究了 Alice Holt 和 Overwey 两地的陶片，这两处陶片从外观上看非常相似，而且两地只有 5 公里之遥，但测量的 23 种元素却可轻易将二者区分①。原子发射光谱在文物保护方面也有很大用途。我国学者用原子发射光谱对敦煌、秦始皇陵、唐懿德太子墓，西安交通大学汉墓等出土的壁画进行了光谱定量定性分析。

（三）X 射线荧光光谱

X 射线荧光光谱分析始于 1920 年左右，直到 20 世纪 50 年代才有较快发展，之后在考古学中广泛应用，研究对象遍及古陶瓷、金银器、铜器、玻璃器、釉、颜料、硬币、宝剑、弓箭、漆木器等，通过对样品中的化学成分进行定量定性分析，从中找出元素含量的规律性，从而进行更多方面如年代、真伪、产地等的分析。

任何物质都是由原子组成，原子中间是由质子和中子组成的原子核。周围是绕原子核沿半径以一定的轨道转动的电子，而电子数目与质子数目相同。电子转动轨道的半径由原子核（主要是质子数目）所决定，每层轨道上所容纳的电子数目是一定的。电子总是先靠近原子核的，即半径小的轨道，而后逐渐占有更外层的轨道。同一种原子，它们的核外电子轨道半径、电子分布情况一样。而不同的原子，其轨道半径、电子分布情况就不一样。也就是说，不同的原子它们轨道电子间的能量不同。当用 X 射线、α 粒子或质子轰击原子时，原子内层轨道上的电子脱出原子，处于激发态，此时，原子外层上的电子会自动跃迁到内层，去填补这个空位，而外层电子比内层电子的能量高，所以在外层电子向内层电子跳跃过程中必然释放

① Hart F A et al. The Chemical Analysis of Ramano - British Pottery from the Alice Holt Forest; Hampshire, by Means of Inductively - Coupled Plasma Emission Spectrometry. Archaeometny, 1983, 25: 179.

出能量，这种能量以光的形式表现出来。我们将在极短过程(10^{-15}秒)完成的光称为荧光，又因所发出的光其相应的波长是在X光波段，所以又称X射线荧光。X射线荧光的波长取决于物质中元素的种类，对于每一种元素，其X射线荧光都具有相对应的特征能量或特征波长。因而，只要测定X射线的能量或波长就可以判断出原于的种类和元素的组成，根据该波长荧光X射线的强度就能定量测定所属元素的含量。

由上面的荧光分析原理可知，X射线荧光光谱是一种无损分析，对分析的样品没有处理要求，不取样，不受状态、大小、形状的限制。同时，分析速度快，自动化程度高，一般一个样品5~10分钟左右就可以测定出主要元素和次要元素。还有，分析范围广，一次可将样品中所有的元素鉴别出来，从常量到微量元素都可。但是使用该法时，要考虑文物在埋藏过程中受到各种侵蚀，化学组成发生了变化，在检测时既要进行表面分析，也要对内部保存的部位进行分析。另外，由于X射线荧光光谱分析是一种相对的比较分析，难以作绝对分析，定量分析需要标样；对于超轻元素，目前还不能进行分析。

X射线荧光分析仪器又分为能量色散型X射线装置和波长色散型X射线装置。分别借助X射线的能量、波长分辨来实现。前者能在很短的时间内对很多样品作测定，还可分析微量样品，样品可大可小。后者则对文物作精密准确的分析，样品必须放入样品盒中，不能太大，样品选择时，大块样品要去掉表面层以减少分析误差。因X射线荧光分析技术是一种表面分析技术，在作定量分析时，多用标准曲线法或滤纸薄样法。

X射线荧光分析在实际运用中往往要测量分析大量的样品，用统计方法寻找其规律。X射线荧光分析经常给人们带来意想不到的信息，Schoeniger等人运用X射线荧光分析术和其他元素分析技术对美国田纳西州的一处古代猎人群体、农业群体的肋骨样品进行研究，其结果与推测的刚好相反，猎人群体的含锶量是农民群体的1.5~1.8倍，表明两个群体的饮食结构不同，而且猎人吃的是当地的淡水陆生软体动物(其含锶量高)①。周仁等对我国古瓷进行了系统的X射线荧光分析②，发现唐至明代的瓷器上SiO_2含量在70%以上，Al_2O_3在20%左右或以下，而

① Schoneniger M J et al. Journal of Archaeological Science, 1981, 8: 391.

② 周仁等:《中国古代陶瓷研究论文集》，中国轻工业出版社1983年版。

清瓷的 SiO_2 都低于 70%，Al_2O_3 却大于 20%。有些研究者对唐三彩及东亚、东南亚、北非诸国的仿唐三彩通过 X 射线荧光分析法（用能量色散 X 射线分光仪、扫描电子显微镜对各标本测试）研究，得出中国器胎的低钙、中铁峰十分显著，而伊斯兰器胎的高钙、高铁峰非常明显，用这种迅速而非破损的方法辨别文物的不同产地或真伪比较理想①。

X 射线荧光分析最适合研究古画中的颜料成分。采用 X 射线衍射法和 X 射线荧光分析法，我国学者曾对敦煌莫高窟、西千佛洞的 50 多个洞窟 11 个朝代 300 多个样品进行系统分析，得出了这些矿物颜料的结构和成分。

二、文物组成的结构分析

（一）文物的物相分析

1. X 射线衍射

X 射线衍射（X - Ray Diffraction，XRD）又称 X 射线物相分析法，主要用于物质的物相结构及化合物形态的分析。当 X 射线作用于晶体时，大部分射线将穿透晶体，极少量的射线产生反射，一部分为晶体所吸收。X 射线是电磁波，在晶体中产生周期性变化的电磁场，迫使原子中的电子和原子核也进行周期振动。因为原子核的质量比电子大得多，故其振动可以忽略。所以，振动着的电子就成了一个新的发射电磁波的波源，以球面波方式向各个方向发出与入射 X 光波长、频率、周期相同的电磁波。这种入射 X 光按一定方向射入晶体，与晶体中电子发生作用后，再向各个方向发射 X 射线的现象称为散射。原子散射 X 射线的能力和原子中所含电子数目成正比。电子越多，放射能力越强。由于晶体中原子散射的电磁波互相干涉和相互叠加而在某一方向得到加强或抵消的现象称为衍射，其相应的方向称为衍射方向。一个原子对 X 射线的散射能力，取决于它的电子数。晶体衍射 X 射线的方向，与构成晶体的晶胞大小、形状以及入射 X 射线的波长有关。衍射光的强度，则与晶体内原子的类型和晶胞内原子的位置有关。所以，从所有衍射光束的方向和强度来看，每种晶体物质都具有自己的衍射图，从而可以将衍射图看作是晶体化合物的“指纹”，可作为定性分析的依据。这即是 X 射线衍射进行物相组成分

① 马文宽：《中国古陶瓷的科技研究》，《考古文物与现代科技》，人民出版社 2001 年版，第 23 页。

析的原理。

X 射线衍射有劳厄法、周转晶体法、粉末法、背散射衍射法。粉末衍射法用于研究陶器的原料产地、高温物相、矿物掺料以及金属器、油画颜料、石器的检验，其方法是从文物背部或底部取得样品，将待测样品制成粉末进行测定。背散射衍射法是一种非破坏性的方法，可以对样品作整体分析。

1912 年，英国的布拉格（W. L. Bragg）根据实验，导出了著名的布拉格公式：$n\lambda=2d\sin\theta$。在这里，d 为晶面间距，θ 为入射角，λ 为 X 射线波长。该公式指出，只有入射角 θ 等于反射角，且入射角、晶面法线和衍射线三者共面，衍射才会发生。布拉格的这一工作，为后来的 X 射线在化学分析中的应用奠定了理论基础。1913 年，劳厄（von Laue）利用 X 射线衍射分析了五水硫酸铜（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）晶体，得到了世界上第一张 X 射线衍射照片，开创了 X 射线衍射用于材料结构分析的新纪元。直到今日，X 射线衍射分析仍是材料结构分析的主要方法。而在文物产地研究中，这一方法更是起着举足轻重的作用。

图 10.36 是一个陶器样品的 XRD 图谱。在这张图中，横坐标是 2θ 角，纵坐标是衍射峰的强度。X 射线的波长是已知的，于是利用布拉格公式：$n\lambda=2d\sin\theta$，就可以计算出晶面间距 d。d 值得到后，通过查阅数据库就可检索到所分析样品的物相组成。

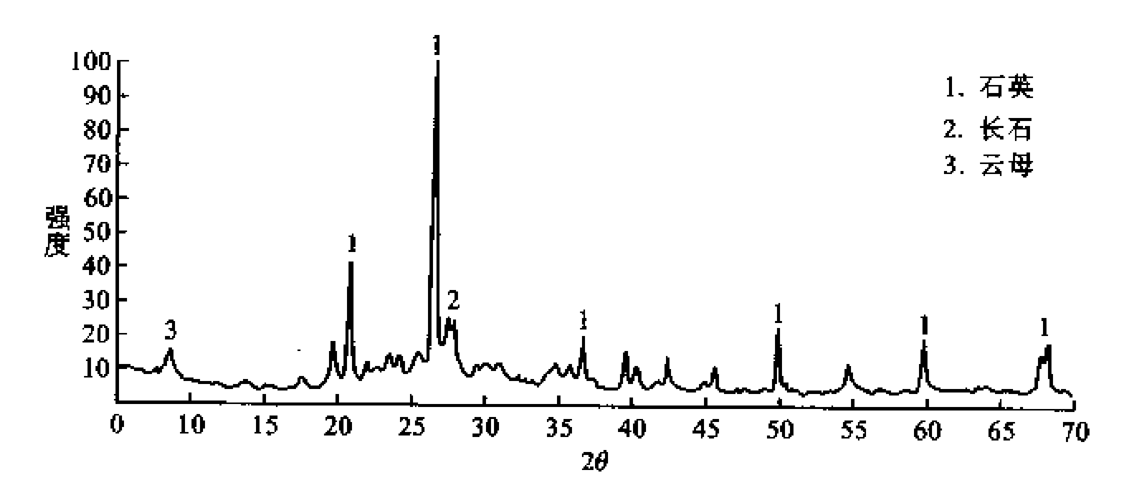


图 10.36 古陶器样品的 X 射线衍射图谱

各种材料 X 射线衍射图谱数据被记录在 JCPDS 卡片上。表 10.4 就是一张

JCPDS 卡片的示意表。在表 10.4 中，左上方的 14 为卡片组号，161 是序号。★表示数据是可靠的；如为○，则表示此卡片的数据较为可靠。与★符号同一方框内的左上方为该物相的分子式，左下角为其英文名称。化学式后常有数字及带下划线

表 10.4　JCPDS 粉末衍射卡片实例

14 - 161

d	3.10	2.71	3.25	8.96	$Na_2Mg_6F(Si_4O_{11})_2$　★ Sodium Magnesium　(RICHTERITE, FLUOR) Fluoride Silicate
I/I_1	100	90	75	4	

Rad. CuK_α λ 1.5418 Filter Ni Dia
Cut off I/I_1 Diffractometer
Ref. Gibes, Miller and Shell, Am. Mineral. 47 75(1976)

Sys. Monoclinig.　S. G. C2/m　(12)
a_0 9.677　b_0 17.914　c_0 5.274　A 0.5402　C 0.2944
α　β 102°57′　γ　Z2　Dx　3.007
Ref. Ibid

ε α 1.57565　nωβ 1.5894　εγ 1.5954
Sign -
2V67.8. calc　* D2.994　mp　color
Ref.　Ibid (* 2V = 70.2　mras.; ZAC = 11.4°)

A synthetic amphibole.
Corresponds to a hypothetical and member of the Richterite series.

dÅ	I/I_1	hkl	Å	I/I_1	hkl
8.960	4	020	2.300	27	35 - 1
8.346	60	110	2.279	22	17 - 1
4.825	14	11 - 1	2.233	8	31 - 2
4.720	22	200	2.188	<5	132
4.481	24	040	2.178	5	171
4.033	16	111	2.163	30	261
3.840	40	13 - 1	2.108	<5	33 - 2
3.404	50	131	1.972	<5	40 - 2
3.353	12	150	1.948	<5	190
3.249	75	240	1.916	8	26 - 2
3.099	100	310	1.876	14	510
2.964	40	221	1.849	8	19 - 1
2.916	26	15 - 1	1.797	8	530
2.784	28	330	1.659	<5	39 - 1
2.711	90	151	1.623	14	480
2.680	18	33 - 1	1.605	6	1,11,0
2.581	30	061	1.577	10	-153
2.505	28	20 - 2	1.571	20	600
2.469	<5	170			
2.361	22	350	Plus 7 lined to 1.282 λ = 1.5405 for D < 2.163		

的英文大写字母,数字表示单胞中的原子数,字母则表示布拉维点阵的类型。

卡片左上方有 10 个小格,首排为 d 值,前三个为该物相三条最强的 d 值,第四个为晶面间距最大的 d 值。第二排为上述晶面的相应强度。在十小格下有四个大格,第一格为实验方法和条件,第二格为物质的晶体学数据,第三格为物质的物理性能数据,第四格为样品的制备条件。

右边的一半为样品的衍射数据,按 d 值由大到小排列,第二列为相对强度,第三列为晶面指数。

X 射线衍射技术对研究古陶器制造原料非常有效。古陶的原料主要是黏土、高岭土等。原料产地不同,其所含矿物种类和数量都有较大的差别。而古代陶器的烧成温度,大致处于 700 ~ 1 000 ℃ 的范围之内,一般不超过 1 000 ℃。在这个温度之下,陶器原料——黏土中的大部分高熔点矿物不会发生变化,其原始形态仍将保留。利用 XRD 对陶器进行分析,就可以对古陶的物相组成进行研究,得到有关古陶产地的信息。X 射线衍射分析也适用于古代颜料的结构分析。

2. 岩相分析

岩相分析是利用偏光显微镜对陶瓷的矿物成分进行鉴定的一种方法,来源于岩石和矿物学研究领域。

矿物是在各种地质作用中形成的天然单质或化合物。由于具有不同的化学成分和晶体构造,每种矿物都有其固有的物理性质,比如颜色、条痕、光泽、透明度、硬度、解理、断口等。利用偏光显微镜对矿物进行岩相分析,除利用矿物的某些物理性质如光泽、透明度、解理等作为鉴定标准外,主要利用矿物的光学性质。这些都可作为矿物识别和鉴定的标准。

按照光学性质的不同,矿物可分为如下四类:

(1) 按照矿物在薄片中的透明度,可将矿物分为透明矿物和不透明矿物;

(2) 根据矿物是否发生双折射,矿物可分为均质矿物和非均质矿物;

(3) 按光率体的轴性,非均质矿物又可分为一轴晶矿物与二轴晶矿物;

(4) 在均质矿物、一轴晶矿物和二轴晶矿物中,按照析射率的高低,又可将矿物依次排列。

均质矿物和非均质矿物的标志鲜明,一般在正交偏光和聚敛偏光间很容易加以区别。一轴晶矿物与二轴晶矿物的区别也较明显,通常在聚敛偏光间根据干涉图的性质就可予以分辨。

岩相分析的基本程序是：将待测样品清洗、干燥后，选择合适截面，用金刚石刀片切割成厚约5毫米的薄片，粘贴到玻璃载片上，再经粗细不同的磨料抛光，制成厚约0.03毫米的光薄片，置于偏光显微镜下进行观察，以识别样品的矿物组成。

岩相分析操作简便，费用较低，并且结果直观明显，一目了然，这是其最大特点。另外，岩相分析可以鉴别出陶土原料中的一些人工掺和物，而其他分析方法对此则无能为力。不过，由于岩相分析需要观察者具备一定的矿物学、晶体学和光学背景知识，专业性和技术性较强，限制了其广泛应用。

图10.37与10.38是两个来源不同的古代陶器的样品置于偏光显微镜下观察所得的图像（单偏光状态，放大倍数200倍）。图片所示，两个样品中都含有大量的石英及长石颗粒，云母含量则较少。在矿物的颗粒形态上，都呈现出有角偏圆的特点；矿物的排列方向性也都比较显著。不过，在颗粒大小方面，图10.37所显示的样品的颗粒大小较为均匀，最大颗粒直径约40微米，而图10.38中的样品的颗粒尺度就大小不一，最大颗粒直径达120微米。

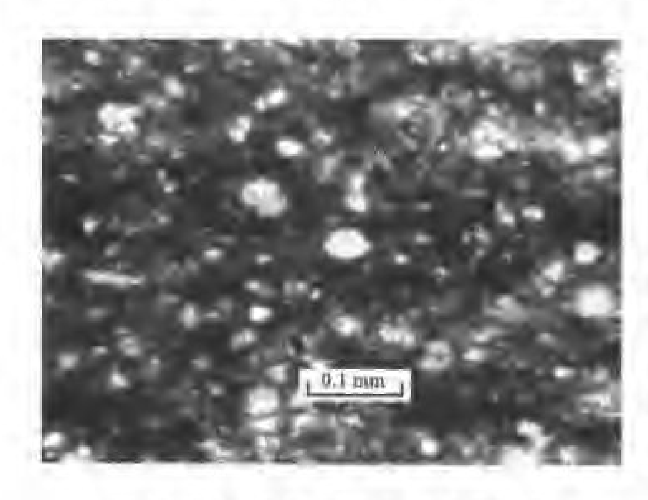


图10.37　单偏光状态下的古陶器岩相照片A（×200）

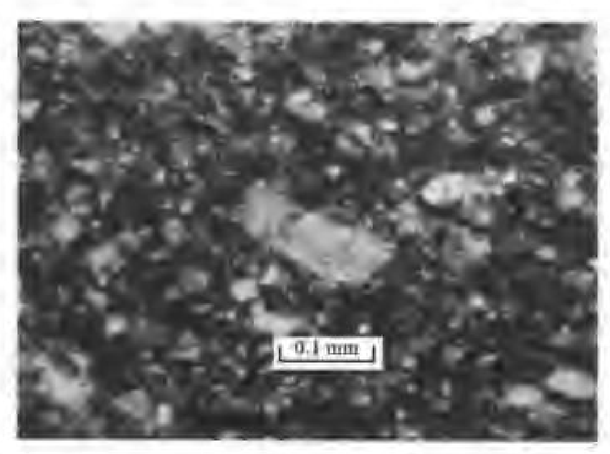


图10.38　单偏光状态下的古陶器岩相照片B（×200）

（二）红外吸收光谱分析

红外吸收光谱（IR），简称红外光谱。它是利用红外分光光度计测量物质对红外光的吸收及所产生的红外吸收光谱，对物质的组成和结构进行分析测定的方法。它是20世纪40年代发展起来的，50年代得到应用，当时用以棱镜为色散元件的

双光束记录或红外分光光度计,60年代,代之以光栅式红外光谱。70年代之后,傅里叶变换技术以及其他新技术(显微红外、色谱－红外联用)后,大大提高了红外吸收光谱的灵敏度、波数精度、分辨率和应用范围,使红外吸收光谱法成为近年来发展最快的光谱学方法之一。

红外光是一种波长介于可见光和微波之间的电磁波,波长在0.75～1 000微米之间,一般分为近红外区、中红外区、远红外区。其中,中红外区是整个红外波段中信息最丰富、最有用的区域,它可以用来测定有机化合物和许多无机化合物,成为光谱中应用最广的部分,所以一般所说的红外光谱就是指中红外区的红外光谱。

任何物质都是由分子或原子组成,而不同的物质构成分子的原子间的结合方式不同。当一束具有连续波长的红外光通过物质时,其中某些波长的光就要被物质吸收。物质分子中某个基团的振动频率和红外光的频率一样时,分子就要吸收与它振动频率一样的红外光,由原来的基态振动能级跃迁到能量较高的振动能级。将分子吸收红外光的情况用仪器记录下来,就得到红外光谱图。各种不同基团吸收特定波长的红外光。红外光谱中被吸收的特征频率取决于被照射样品的化学成分和内部结构,可以说红外光谱是物质本身的分子结构的客观反映,物质种类不同,红外吸收光谱图就存在差异。根据物质的红外光谱图鉴定官能团,确定其化合物结构。

由红外光谱原理可知该法最大的特点就是具有高度的特征性,就像人的"指纹"一样,它依据红外光谱的吸收谱线的形状、相对强度来确定化合物。其次是灵敏度高,测量时间短,近于无损的检测。还有,样品量少且不受状态限制。但是制样必须谨慎,固体多采用压片法或溶解成液体,液体取1～2滴滴在两个圆形盐片之间即可进行测量,气体需装人专用的吸收瓶(池)内。然而,红外光谱分析技术在定量分析方面还不够灵敏,只是用于作主要成分的分析,对微量杂质的分析有一定的困难。对复杂的未知的物相分析和结构的鉴定,它只能提供有关基团的结构信息。因此,需要与其他实验技术结合,相互验证才能得到圆满的实验结果。

红外吸收光谱是鉴定化合物和测定分子结构最有用的方法之一。在考古学中利用红外光谱对陶瓷、青铜器、书画等不同材质的文物进行测定和鉴别。主要包括:壁画颜料等无机物的鉴定;文物修复材料的分析及修复材料老化原因的探讨;绘画胶结材料的分析鉴定;丝绸、漆器涂层、生物样品等有机材料文物的测定等。

（三）拉曼光谱

拉曼散射是以印度物理学家拉曼（C. V. Raman）的名字命名的，1928年拉曼用汞灯照射液体苯时，观察到散射现象，并记录了散射光谱。拉曼光谱和红外光谱同属于分子振动光谱，但它们的机理却不同，拉曼散射光的频率位移对应于分子的能级跃迁，因此拉曼光谱技术便成为人们研究分子结构的新手段之一。以拉曼散射为基础发展起来的光谱学，称为拉曼光谱学。

拉曼散射效应被发现以后，在20世纪30年代拉曼光谱曾是研究分子结构的主要手段。但是，由于拉曼效应太弱，深入应用受到了限制。直到60年代，激光的问世，再加上计算机的发展，才给拉曼光谱带来了新的生机，并很快导致拉曼光谱的复苏，使激光拉曼光谱逐渐成为分子光谱学中一个活跃的分支。拉曼光谱以其信息丰富、制样简单、水的干扰小等独特的优点，广泛应用于生物分子、半导体、陶瓷、药物等分析中。拉曼光谱分析已经成为研究分子结构的重要手段。

光散射是自然界中常见的现象。当一束光照射到介质时，绝大部分的光被反射、吸收或透过介质，只有一小部分光被介质向四面八方散射。散射有两种现象：一种是光子与物质分子发生弹性碰撞过程中，没有能量的交换，散射光仅仅改变了传播方向，这种散射现象称为瑞利散射；另一种是光子与物质分子发生非弹性碰撞过程中，散射光不仅改变了方向，而且散射光的频率发生了变化，这种散射现象称为拉曼散射。拉曼散射有两种情况：一种是散射光的波长大于入射光，这种散射光称为斯托克斯线；另一种情况是产生的拉曼散射光波长小于入射光，称为反斯托克斯线。斯托克斯与反斯托克斯散射光的频率与激发光频率之差统称为拉曼位移（Δv）。在常温下，绝大多数分子处于基态，所以斯托克斯散射要比反斯托克斯散射强得多，拉曼光谱仪通常测定的是斯托克斯散射，也统称为拉曼散射。

拉曼位移取决于分子振动能级的改变，不同的化学键或基团有不同的振动，Δv 反映了指定能级的变化。这是拉曼光谱作为结构定性分析的理论依据。拉曼光谱是利用拉曼光谱图来分析物质分子结构。拉曼光谱图是以拉曼位移（波数）为横坐标，强度为纵坐标，以激发光的波数为原点 v_0，便可得到类似红外光谱的拉曼光谱图。

激光拉曼光谱目前是一个很活跃的学科，它的应用尚处于不断开发之中，其应用范围在不断扩大。尤其在考古领域中还刚刚开始。由于拉曼光谱分析可以不破

坏样品,所以非常适合于考古样品的分析。拉曼光谱分析在考古中的应用主要是无机物,如颜料、古玻璃、陶瓷、玉器等,以及有机物,如漆器、染料、纸等的分析。

三、文物的制作工艺研究

(一) 穆斯堡尔谱学

穆斯堡尔效应(Mossbauer Effect)是γ射线的共振荧光现象,它是一种放射性同位素核发生的γ辐射被另一个同类核素无反冲共振吸收的原子核效应。1957年德国年轻的物理学家穆斯堡尔在做博士论文的实验中,发现了这种效应,因这种效应具有极高的能量分辨本领而迅速得到承认并予以普遍应用,并以他的名字来命名,很快形成了一门新的学科——穆斯堡尔谱学。穆斯堡尔谱是建立在观察固体中的原子核对γ射线无反冲发射和共振吸收基础上的一种能谱线,一般可测出原子核能级 $10^{-13} \sim 10^{-16}$ 电子伏的能量变动,因而穆斯堡尔效应被认为是研究物质结构的灵敏探针,广泛应用于物理、化学、生物、医学、地质、冶金、考古等学科领域。目前已在44种元素(比Fe轻的元素除K外,都未观测到穆斯堡尔效应)、85种同位素中观察到穆斯堡尔效应,其中 ^{57}Fe 的14.4千电子伏的穆斯堡尔效应应用最广泛,因为许多物质中铁含量很高。

经过观测,处于固体中的原子,可以实现γ光子的无反冲共振吸收。因此无反冲γ射线经过这一吸收体时,如果入射线的能量与吸收体中的某原子核的能级间跃迁能量相等,这种能量的γ射线会被吸收体共振吸收。入射的γ射线称穆斯堡尔辐射,能实现无反冲共振吸收过程中的原子称穆斯堡尔原子。当发射一系列不同能量的γ光子时,与穆斯堡尔原子核跃迁能量相同的γ光子显著被共振吸收,而能量相差较大的γ光子则不被共振吸收,两者在透过计数器上的计数也不同。因此在能量的坐标轴上,可以找到被吸收γ光子的能量位置。这种经吸收后所测得的γ光子数随入射γ光子能量的变化关系就称为穆斯堡尔谱①。

众所周知,古陶和黏土中一般含有5%～10%的铁元素。因而,穆斯堡尔效应在考古中主要用于研究古陶、黏土和其他含铁元素较多的遗物。陶器在古代使用过程中数量多、品种丰,因而对其研究穆斯堡尔效应也比较系统,从陶器的原料来

---

① 张宝峰:《穆斯堡尔谱学》,天津大学出版社1991年版,第34—35页。

源、工艺、烧制技术颜色到年代确定都很成功，而且还可作一些定量定性分析。古陶的穆斯堡尔谱形主要决定于原始的烧成条件，即烧制气氛和烧成温度。谱形决定于古陶的物相。如果重烧古陶的气氛接近于古陶原始的烧制气氛，只要重烧温度不超过原始烧成温度，古陶的物相不会发生变化，穆斯堡尔参数保持不变的最高重烧温度即可作为古陶的原始烧成温度。此外，也可用于古代颜料，书画漆木器、青铜器、钱币、兵器在内的各类文物的分析。

穆斯堡尔谱学能够很好地对文物进行物质结构形态、化合物的微观结构进行分析，与其他考古分析相比，它有许多优越件：

（1）它是一种非破坏性或很少破坏的分析方法。

（2）需样品量少，而且对其纯度、品价质量要求不高，100 毫克就可得到满意的穆斯堡尔谱线。

（3）穆斯堡尔谱仪便宜好用。

当然，该技术也有局限性和片面性，具有穆斯堡尔效应的只有 40 多种元素，一般须在低温条件下进行；而且研究对象只局限于固体和少数冷冻液体。最好与其他化学元素分析方法相配合。

实际操作中是将发射和吸收 γ 射线的原子核各自嵌在适宜固体的晶格中，使在发射和吸收 γ 射线时反冲能量的接受者是一整块晶体。两者的反冲能量对整块晶体来说趋于零。这样便实现了发射谱线和吸收谱线的重叠，即实现了原子核间的共振吸收。在这个过程中发射的 γ 射线能量调制是利用多普勒效应实现的，即放射原子 γ 射线获得需要的多普勒速度束补偿因原子核反冲损失的能量，从而达到 γ 射线的共振吸收。

穆斯堡尔谱学通常以两种方法获得。一种是透射法也叫共振吸收法，是通过测量透过吸收体的 γ 射线计数而获得谱线。当吸收体发生共振吸收时，透过计数器最小，形成倒立的吸收峰，在谱线上会出现一个凹谷，即吸收线。透射法实验装置简单且计数率高，很容易获得质量较好的谱图，但样品必须是薄片形状，且有一定的厚度限度。另一种方法是背散射法，也称共振散射法，是通过测量由吸收体散射的 γ 光子计数得到的穆斯谱尔谱线。也就是吸收体共振吸收处于激发态，再向基态跃迁时发射出 γ 射线感内转换电子和二次 X 光到探测器内计数，其谱线是正立的峰。背散射法对样品没有厚薄要求而且无需制备样品，因而是一种无损测量的方法。

目前广泛使用的穆斯堡尔谱仪都是利用多普勒效应来调控 γ 射线能量，一般由 γ 射线源、多普勒速度振子、探头、样品架、多道脉冲分析器、计算机、打印机等部件组成。其工作原理示意图见图 10.39。

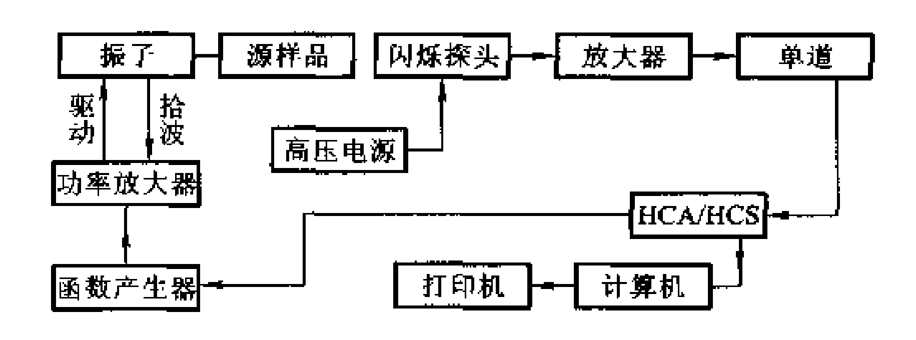


图 10.39 穆斯堡尔谱仪工作原理示意图

穆斯堡尔谱用共振吸收峰强度、同质异能移、多普勒解移、谱线宽度和面积、面积比值、四极分裂值和磁分裂值等作参数，共同提供样品的结晶学信息。

利用穆斯堡尔谱可进行考古学年代的断定。古陶器长期埋在土壤中，陶器内的晶体（石英、长石等）受到天然放射性元素的辐射损伤会形成晶体缺陷，同时土壤的风化作用使陶器晶粒变细、氧化铁颗粒减小，这些变化都同时间有关，在穆斯堡尔谱线中均可得到反映。换句话说，由于风化和自然辐射是年代效应的两个主要因素，前者使古陶中的粒度变细，穆斯堡尔谱反映为其"磁分量比"随测试温度的变化与年代相关，后者则造成了顺磁四极分裂双峰的强度不对称，用人工辐射可消除其不对称性。可见，即使陶器原料和烧结工艺相同，但是年龄不同，其穆斯堡尔图必然不同。通过一批已知和出土的古陶样品测谱，得到顺磁 Fe^{2+}、Fe^{3+} 的同质异能移和四极分裂值，由其分布可推出古陶产地。从辐照剂量的大小可估算古陶的年代，还可通过穆斯堡尔谱鉴别颜料年龄的状态。穆斯堡尔谱记年法常用来测定古陶瓷、古砖瓦、青铜器、钱币、铁器等遗物的年龄，它具有精度高、方法简单、速度快等优点。

郑州大学物理实验室用穆斯堡尔谱定标 a - Fe 对河南巩县三彩片进行了测定，发现红胎三彩温度在 800 ± 50℃，白胎三彩在 1 100 ± 50℃，两者均属含铁量较少的陶土所制，硬度差，蚀水性大，否定了过去认为的红胎为陶质、白胎为瓷质的说法。

（二）核磁共振

核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance，NMR）是利用物理原理来研究固体的物质结构尤其是分子结构的。NMR 技术是基于物质的特性而被广泛应用于化学、物理、生物、医学、考古、石油等学科。该方法具有不破坏样品、分辨率极高以及核磁共振谱线参比量较多等优点。

原子核既带有电荷，又可以自旋，在自旋运动中会产生磁场，因而具有磁偶极矩，核磁偶极矩在外磁场中又会产生磁能级分裂。在适当的外场作用下原子核会产生磁能级的共振跃迁现象，称之为核磁共振。在这个过程中，除外磁外还有核自旋与周围的物质间的磁相互使用的等效磁场，而这些磁场强烈地依赖于核自旋处的化学环境。一般地将磁场强度和射频频率中的一个固定，改变另一个去促使样品发生核磁共振，便可得到物质组成、结构及其变化过程中的信息。

核磁共振技术对有机考古样品的鉴定、测试等方面发挥很大作用，它补充了光谱、色谱的某些不足，如有人用核磁共振曾确定了脂肪酸链的平均长度，确定了公元前 6 世纪到公元前 4 世纪的古代油样中含有大量油酸；确定了公元 3 世纪的一固体油脂中主要含有肉豆蔻酸、棕榈酸；证实了松香烯结构确为天然树脂的微量成分；分析了波罗的海的琥珀解热中包含的 P－对异丙基甲苯比现代的树脂明显要少等信息①。

（三）热分析

在加热或冷却的过程中，物质的结构、相态和化学性质发生变化，并且通常伴有物理性质的变化，包括质量、温度、热量以及机械、声学等性质，通过程序控温，分析样品在高温过程中的结构变化和物理化学变化的一类技术即热分析法。热分析法技术很多，以差热分析、热重分析和热膨胀法为常见。

1. 热分析类型

热分析类型主要有以下几种：

（1）差热分析（Differential Thermal Analysis，DTA），是在控制温度的前提下，测量样品和参比物（一种在测量温度范围内不发生任何热效应的物质）之间的温度差与温度关系的一种技术。用电炉或恒温槽将样品和参比物在相同的热条件下加

① 张金萍：《文物的分析与检测》，《东南文化》2000 年第 3 期。

热或冷却,用热电偶测量两者之间的温度差。其结果以差热分析曲线表示,该曲线描述实验样品和参比物之间的温度差随温度或时间变化的关系曲线。

(2) 热重分析又称差重分析(Thermogravimetry,TG),与差热分析类似,它是测量物质重量与温度的关系的一种技术。热重法记录的是热重曲线(TG 曲线),它是以质量作纵坐标,从上向下表示质量减少;以温度(T)或时间(t)作横坐标,自左向右表示增加。用重量变化的最低幅度可确定陶瓷烧结温度的上限。

(3) 热膨胀法,是通过改变温度来测量体积的变化。物质在一定的温度和压力下具有一定的体积,当温度升高时,其体积也会相应增大,这就是热膨胀。考古学中用热膨胀仪来测量,用热膨胀曲线表示结果。

另外,综合热分析仪是将多种分析技术组合起来的一种仪器,是差热、热重和热膨胀仪的组合。用加热炉体进行加热,热电偶镜检和灵敏检流计测量差热过程,用照相法记录温度和差热曲线。热天平用于称重,当样品质量有所变化时,上面的反光镜随之倾斜使反射光位移;同时照相法记录下样品重量的变化曲线。线膨胀装置用于测量样品的热膨胀数据。用综合热分析仪可同时得到差热曲线、热重曲线和热膨胀曲线,并且对全部数据进行综合处理。

2. 热分析法的应用

目前考古工作中应用的热分析技术以单个技术为主,综合热分析仪仍处于探索阶段。一般地,用差热分析来鉴别玻璃、纸张、矿石、炉渣、遗址的土壤,获取陶瓷的烧制温度信息。热重分析和差热分析相似,最适宜确定较低温度下烧制的陶器的烧结温度。热膨胀法亦主要用于陶片原始温度的分析。各种热分析技术准确率较高,信息量也充分,但所需样品多而且对样品有损伤。如有人利用差热分析技术对古埃及纸莎草纸和现代纸进行对比研究①,其结果发现:在 70 ~ 100℃ 时脱水峰减小,200 ~ 360℃ 时纤维素分解峰增大,360 ~ 470℃ 时木质分解峰增大,证明了古代纸和现代纸的区别。

(四)离子束分析

离子束分析(IBA)是利用加速器所产生的高能离子束去轰击样品产生电磁辐射和带电粒子,通过探测这些辐射或粒子就可进行研究物质样品的定量、定性分

① 李余增:《热分析》,清华大学出版社 1987 年版。

析，进而研究样品的起源、制造原料、工艺技术等。

离子束分析法常见的有卢瑟福背散射(RBS)、核反应分析(CRA)、质子激发X射线荧光分析(PIXE)、质子激发γ射线分析(PIGME)。这些技术是在20世纪六七十年代发展起来的元素分析技术，具有灵敏度高、测量迅速、低成本、样品量极少、非破坏性等特点。考古中用离子束分析法分析陶器和黏土、骨头、毛发、牙齿、金属器物、黑曜岩及其他材料文物，从而进行文物制作原料、工艺方面的研究。

1. 卢瑟福背散射

卢瑟福背散射是通过探测样品表面区靶核弹性散射的离子束进行分析的一种方法。从物理学可知，当入射粒子与靶质子核发生库仑相互作用时，入射粒子受靶质子核的库仑力作用而发生散射，散射粒子的能量与靶原子的质量有关，依据散射能量及强度可辨识不同的靶原子。由于入射粒子在散射过程中要损失能量，处于不同深度的靶原子所散射回来的粒子能谱不同，这样便可提供靶原子深度分布信息。

卢瑟福背散射操作简单，将样品放入可旋转的定角器上，从静电加速器获得的α粒子束经分析选择进入管道，之后α粒子束打在样品上，被探测器探测到并将信号经放大器放大，再送入多道分析器形成一能谱，最后被输到计算机进行运算。卢瑟福背散射对轻元素分析较佳，国外常用来对骨头样品测定。一般多与其他分析方法共同使用，如秦始皇兵马俑坑出土的青铜箭经卢瑟福背散射、核反应和质子激发X射线荧光分析，得到了器物表面、内层的成分元素。卢瑟福背散射分析结果为样品内部、表面成分显然不同，内部含Cr、Sn、Pb等元素，核反应显示样品表面有C、N、O元素，质子激发X射线荧光分析表明不锈蚀的箭镞表面含大量Cr，而锈蚀的箭镞和箭镞断面则无Cr①。

2. 质子激发X射线荧光分析

质子激发X射线荧光分析(PIXE)开创于1970年，如今已发展成为一种成熟的多元素分析技术，广泛应用于材料、地质、冶金、生物、医学、考古与环境科学中，它是用加速器产生的高速带电粒子轰击待测样品靶，使样品靶中待测物质的原子受激发、电离，当所形成的内壳层空面由外层电子填充时，会激发出表征某种原子(元素)固有的特征X射线，通过测量多种元素的特征X射线，就组成了样品的X

① Cheng H S et al. Nucl. Instr, and Meth, 1991, 191: 391.

荧光谱,通过对谱线峰能量和强度的精确计算,便可识别元素的种类。

质子荧光分析的样品可以是固体、气体、液体,但必须将其制成均匀的薄靶,称为制靶技术。对生物样品,用低温灰化法,植物样品用加温加压的砂化工艺制靶。质子荧光分析实验装置主要有真空质子X荧光分析、外束质子X荧光分析、质子显微镜三种形式。凡是有小型粒子加速器的实验室都可以开展X荧光分析。1980年,复旦大学物理所用质子荧光分析法对国宝"越王勾践剑"进行了无损分析,该剑长64.1厘米,宽5厘米,剑面有黑色花纹,剑格上嵌玻璃、绿松石等饰物。从剑面黑花纹处测得的PIXE能谱中发现有硫,说明它经过表面硫化处理;从剑格玻璃的PIXE能谱中发现大量的钾、钙元素,说明2 500年前中国已有钾钙玻璃,比英国的钾钙玻璃早了1 000多年,否定了当时中国只有铅玻璃的传统结论①。

3. 核反应分析和质子激发γ射线分析

核反应分析和质子激发γ射线分析(PIGME或PIGE)同属核反应,都是短程核力起作用,基本原理也相似。当高能离子束与靶材料发生核反应(具有一定能量的粒子与原子核A碰撞,形成了的质子核B和粒子b的过程为核反应)时,产生瞬发次级射线,辐射时间为10^{-14}秒或更少,测量反应瞬发次级射线,如中子、带电粒子或γ射线,并对其能谱进行分析,即可确定待测样品材料的成分、杂质含量及其分布。质子激发γ射线分析技术非常适合测定骨头样品。国外学者通过实验,认为测量骨头中F、Na、P,统计误差达0.5%,而N、O、Mg、Ca可达2%。对黑曜岩的分析,质子激发γ射线分析已有过多次成功例子。Duerden等人对太平洋地区的几千种黑曜岩样品采用质子激发γ射线分析方法和质子X荧光分析法,测出了Si、K、Ca、Ti、Ba、Mn、Fe、Ce、As、Pb、Br、Y、Zr、Nb等元素的大量数据,为人类的起源提供了重要资料。

思考题

1. 简述多元分析法及其种类。

① 金国樵等:《物理考古学》,上海科学技术出版社1989年版,第167—168页。

2. 对比X光照相技术与中子射线照相技术的特点,阐述这两项技术对考古研究所起的作用。

3. 文物的成分分析有什么特别的要求,如何看待文物的有损分析与无损分析?

4. 什么是物质结构的分析技术? 目前常见的分析方法有哪些?

5. 简述扫描电子显微镜在文物上的应用。

6. 以你熟悉的文物种类为例,论述文物生产工艺分析的方法论。

第十一章
文物产地与矿料来源研究

文物产地与矿料来源研究是利用现代自然科学方法和手段，通过对文物的主量元素、微量元素及同位素等的测定分析，从中提取文物产地与矿料来源的信息，结合考古学背景，以探讨古代文物的生产、传播、贸易、交流等经济、社会和文化问题，为考古学复原古代人类历史面貌、探索历史发展规律提供科学、定量的依据。

第一节　文物产地与矿料来源研究的发展及其意义

文物产地与矿料来源的研究，是科技考古研究开展最早且一直受到重视的领域之一。

1842 年，德国 Dorpat 大学的戈培尔（F. Gobel）教授分析了俄国 Baltic 省出土的黄铜器，并认为这些铜锌合金应产于罗马帝国。19 世纪 50 年代，奥地利学者沃塞尔（J. E. Wo－cel）博士在其两篇古代青铜器研究论文中提出，文物化学成分与其制作时间、地点存在着一定联系。在对古代金属文物进行化学分析的基础上，沃塞尔博士对成分数据进行了统计处理，并提出了化学性质群的概念，这对文物产地与矿料来源研究的深入开展，有着不可低估的影响①。

① 王昌燧：《文物产地研究发展简史》，《科技考古论丛》（第 2 辑），中国科学技术大学出版社 2000 年版。

19 世纪 60 年代中期,法国矿物学家达牟(A. Damour)博士研究了凯尔特人纪念碑附近和野蛮部落中发现的一批硬质石斧。通过矿物学方法的分析,他发现这些石斧的材质十分复杂,包括石英、软玉、翡翠、玛瑙、碧玉和氯黑榴石等。在报道上述结果的论文中,达牟博士提出了两个非常重要的观点:一是通过了解文物的化学成分和地质特征,有望探索它们的矿料来源,为研究史前先民迁徙路线提供有意义的信息;二是考古学家应该认真细致地作好发掘记录,而自然科学家应该从各自领域出发,帮助考古学家给出考古发现物的意义。

1869 年,法国的福克(M. Fouque)测定了圣陶里地区火山凝灰岩和出土陶器的化学成分,并对二者做了对比分析,发现它们具有不同的化学成分。在他之后,美国哈佛大学的理察德(T. W. Richard)教授在 1895 年测定了波士顿精美艺术博物馆的一批古雅典陶器,认为这批陶器很可能出产于古雅典城。同时,理察德教授还提出了两个重要观点:一是样品群中,如果各样品的某一元素含量集中在一个狭窄的范围内,则预示着它们来自有限的地理源头;二是建立相当规模的"数据库",将待分析样品群的测试值与之比较,是系统研究文物产地的前提。这两点意见至今仍对文物产地研究具有重要的指导意义。1928 年,布拉德福(W. Bradfield)教授和杰克逊(F. G. Jackson)博士采用湿化学法对陶器及浆料进行了分析。布拉德福教授的学生——谢泼德(A. O. Shepard)博士参加了这一工作,并最先将岩相分析方法应用于陶器的分类和来源研究中。谢泼德博士还将化学、矿物学方法与陶器外形、颜色和纹饰等陶器外部信息结合在一起,作为陶器分类的依据,被认为是第一个注意到实验室技术、产地和分类间相互关系的专家。20 世纪 50 年代中期,美国著名核物理学家、"原子弹之父"奥本海默(J. R. Oppenheimer)教授建议将中子活化分析用于文物的产地研究。不久,塞耶(E. V. Sayer)教授和道德森(R. W. Dodson)教授利用中子活化分析方法,成功地研究了地中海地区出土古陶器的产地。

20 世纪后半叶,国际上文物产地与矿料来源研究进入了一个大发展时期,许多国家的研究机构、个人对其表现出了极大的兴趣,大量的人力物力投入到这一领域中来,使得这一研究领域在此期间取得了长足的发展。总结这几十年的工作,主要是在以下四个方面取得了进展:

(1)一些新的研究方法逐渐建立起来,如铅同位素比值分析,在大理石、玻璃、

金属器、颜料等文物的示踪研究中都得到了较好的应用，取得了不少有意义的成果。

(2) 越来越多的现代分析技术被引进到研究中，分析手段变得丰富多样。研究者可以根据研究目的的需要，选择合适的分析测试方法，或不同分析方法相结合，得到多方面的信息。

(3) 分析仪器的测试精度越来越高，应用范围也日益拓宽。仪器性能的提高，使得一些往日难以取得的指标，现在很轻松地就可以得到。

(4) 多元统计分析方法得到广泛应用，使研究者可以同时处理更多的数据，从而能够得到更为全面的信息，同时分析也更加科学，所得结论也更为合理。

除上述四个方面的进展之外，20 世纪后半叶的研究工作还有一个最重要、最鲜明的特点，就是研究思路的拓展。在这个时期内，多数研究者渐渐地不再满足于仅仅停留在对古代文物的产地和矿料来源探索的层面上，而逐步向更深、更高的层次拓进。研究者利用文物产地信息，进一步探讨与之相关的古代生产活动组织、社会结构、不同区域和民族之间的文化交流、贸易往来等深层次的问题，从而使文物产地与矿料来源研究上升到了一个更高的层面。

以上成果的取得，显示出文物产地与矿料来源研究具有重要的意义。

详细说来，考古学作为广义历史学的重要组成部分，它与狭义历史学最大的区别在于其研究古代文化的基本材料是实物，即考古发现的遗迹和遗物，而获取资料的主要手段是在地层学和类型学指导下的田野调查与发掘。确定古代文化遗存的时间与空间坐标是考古学研究的基础。考古地层学的成熟和日臻完善，^{14}C 测年技术等科学测年方法的应用与不断改进，使得建立考古学研究中不同文化、类型及遗存的时间坐标的目的基本能够实现。但要建立古代文化、类型、遗存的空间坐标，考古学本身的地层学和类型学两大方法论所能做到的就相对有限了。

考古学文化是一个开放的系统，一个文化或类型的遗存中一定包含着其他文化、类型的物品，这是文化交流的必然结果。确定遗存、文化空间坐标的方法，主要是在类型学的指导下，通过对一种文化的器物组合、器型、装饰风格等进行分析，总结其发展演变的规律性，从而确立此种文化区别于其他文化的标准。不同遗址、不同文化中互见的物品通常反映着遗址之间、文化之间的相互关系。但到底是什么

样的关系？两者之间是和平交往，还是暴力掠夺？是观念交流的产物，还是贸易的结果？对于这些问题，考古类型学的理论和方法往往束手无策，文化因素分析方法有时也无能为力。

例如，在古陶瓷研究中，过去主要依据器物的造型、纹饰、胎釉色泽、款字等外部特征来排队、比较，以确定其年代和窑口。然而对那些同一窑系多个窑口生产的，造型、纹饰、风格相近但没有字款的器物进行分类研究以确定其具体生产地点，传统的考古学方法一般难以奏效。又如，中国三代文明的主要标志——青铜器，特别反映了古代地区间的交换关系，对其产地、矿料来源等问题的研究，传统的方法所能做到的非常有限。

“产地研究”与“矿料来源研究”是两个密切相关又含义有别的概念。前者主要指陶瓷等可以就地取材制造的器物，因而其产地通常就是其原料来源地。后者则主要针对金属器物如青铜器，这是由于金属器物的制造地点和其原料产地往往并不相同，产地分析所能得到的仅仅是反映其原料产地的信息。

伴随着现代自然科学各学科的飞速发展，人类对自然界的认识产生了质的飞跃。由于生产实践及科学研究的需要，科学家对各种有机物、无机物的物理与化学性质等有了更加深入的了解。地球化学知识告诉我们，由于成岩条件不同，出产于不同地区或同一地区不同地质层位的岩石、矿物，在化学结构与元素组成上均会存在不同程度的差异。因此，利用自然资源制造的任何人工物品，都或多或少地携带着其原料产地的特征信息。而这些特征信息，恰似人的指纹一样，具有地区的特异性，因而被称为“指纹”信息。提取和分析存在于文物之中的这些指纹信息，就可望由流溯源，找到其产地或矿料来源。通过对文物产地与矿料来源的研究，不仅可为我们提供古代先民开发、利用自然资源的宝贵资料，而且能反映古代矿料的传播路线，为探讨古代社会不同地域和人群之间的文化交流、贸易往来、交通运输，以及生产组织、社会结构等多方面、深层次的问题奠定坚实的基础，对考古学文化、遗存的空间标尺的建立起到积极的推动作用。

第二节　文物产地与矿料来源研究的分析方法

探索文物产地与矿料来源是科技考古学研究的一个重要领域，可以深化考古学研究。文物产地研究是在考古学的基本方法指导下，利用自然科学的分析方法进行的。经过百余年的发展，其技术手段不断改进。20世纪后半叶，许多现代仪器分析技术的引进，使文物产地与矿料来源研究的分析方法呈现出丰富多样的特征。研究者根据研究对象和内容需要，既可分别选择不同的分析方法，又可将多种分析方法相结合，以得到多方面、多层次的信息。同时，随着科技的发展，各种分析仪器的测试精度、准确度和自动化程度也越来越高，应用范围日益拓宽，使得一些以往不易实施分析的物质或难以取得的指标，也逐步能够进行分析并得到需要的数据。可以说，文物产地研究已经具备了坚实的技术基础。

文物产地研究的分析方法种类繁多，目前比较成熟、应用较多的是中子活化分析、电感耦合等离子体发射光谱分析、铅同位素比值法。通过文物化学成分的测定分析，达到研究其产地与矿料来源的目的。近年来，又有学者将同位素示踪方法应用到文物产地研究中来，这种方法具有一定的潜力。

一、中子活化分析

中子活化分析(Neutron Activation Analysis，NAA)是活化分析中的一种。从本质上讲，活化分析是一种核分析方法，其基础是核反应。利用一定能量流强的中子(包括热中子、共振中子和快中子)、带电粒子(质子、氘子、氦-3、氦-4以及重离子等)或者高能γ光子轰击待测试样，发生核反应，反应过程中产生瞬发辐射，核反应所生成的放射性核素衰变时又放出缓发辐射。由于射线能量和半衰期是放射性核素的特征量，通过测定放射性核素的半衰期或者所放出的射线的能量，或者直接测定瞬发辐射，就可以实现元素的定性分析；而通过测定射线强度，便可进行定量分析[1]。

中子活化分析的基本过程：首先，寻找最佳方案，熟悉样品的属性，大致特征，

---

① 〔比利时〕霍斯特等著、伍任译：《中子活化分析》，原子能出版社1978年版。

计算最佳辐射条件和冷却时间。接着，制备样品和标准样品，后者为防止反应堆中子强度变化带来的误差作参照标准。不同形态的样品采取不同的制备方法，块状固体直接截取放入容器中；粉末状的样品还应称重；液体样品则要放在聚乙烯容器或石英安瓶内；气体样品，测好体积后放入石英管中。样品制好后放入金属罐内，等待辐射。接着选择最佳的辐射源，是使用反应堆、加速器还是同位素中子源。然后进行辐射、冷却，进行辐射源工作的同时，探测系统（包括半导体探测器，闪烁计数器等探测器和多道分析器）开始运转，测定核素的半衰期和射线能量、强度。最后是利用电子计算机进行数据处理，利用公式计算出所测元素的含量。

1953 年，法国人阿尔伯希洛（G. Ambrosino）等人利用中子活化分析测定了古钱币和铅顶砖内的银，成为首先将这一方法应用于考古研究中的学者。这是中子活化分析方法在文物产地研究中的最早尝试。此后，随着中子活化分析方法的发展，该方法在文物研究中的应用越来越多。目前，中子活化分析已成为文物产地和矿料来源研究中成分分析的主要方法之一，可用来分析化学元素周期表中的大部分元素①。在考古学中，中子活化分析主要用来测定陶瓷器、玻璃、银币、铜镜、燧石、骨头化石等样品中的微量元素和痕量元素，进行统计分析，寻找它们之间的共同性和差异性，从而确定文物元素成分的演变，探索其产地及矿源等。

与其他元素分析法相比较，NAA 法有许多优点。其一是灵敏度、准确度、精确度高。NAA 法对周期表中 80% 以上的元素的灵敏度都很高，一般可达 10^{-6} ~ 10^{-12} 克，其精度一般在 ±5%。其二是多元素分析。它可对一个样品同时给出几十种元素的含量，尤其是微量元素和痕量元素，能同时提供样品内部和表层的信息，突破了许多技术限于表面分析的缺点。其三，取样量少，属于非破坏性分析，不易沾污和不受试剂空白的影响。另外，仪器结构简单，操作方便，分析速度快。它适合同类文物标本的快速批量自动分析，因此 NAA 法特别适合考古样品的成分分析。

中子活化法的缺点：检测不到不能被中子活化的元素成分，半衰期短的元素也

① 李士、秦广雍：《现代实验技术在考古学中的应用》，科学出版社 1991 年版，第 290 页。

无法测量。此外，探测仪器也较昂贵。

二、电感耦合等离子体发射光谱

原子或离子受热能、电能或光能作用时，外层电子得到一定的能量，由低能级跃迁到高能级，这时的原子（或离子）处于激发态。处于激发态原子中的电子是不稳定的，它只能在高能态的轨道上停留约 10^{-8}秒，然后自发跃迁到低能级轨道上，其能量便以光的形式发射出来，形成一条谱线。处于高能级的电子也可以经过几个中间能级跃迁回到原能级，这时可产生几种不同波长的光，在光谱中形成几条谱线。一种元素可以产生不同波长的谱线，它们组成该元素的原子光谱。由于不同元素的电子结构不同，因而其原子光谱也不同，具有明显的特征。通过分析光谱线特征，便可进行定性分析；而通过测定光谱线的强度，根据光谱线强度和元素浓度的关系，便可进行定量分析。这便是原子发射光谱分析化学元素的理论基础。

电感耦合等离子体原子发射光谱分析法（Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrum, ICP-AES）是以 ICP 等离子炬作为激发光源，使待测样品中的原子被激发并发射出特征谱线，再根据特征谱线的波长和强度来确定样品中所含的化学元素及其含量的一门分析技术。

ICP - AES 分析技术具有以下主要优点：

（1）元素的检出限低，比原子吸收光谱法低一个数量级；

（2）分析的精密度高，当浓度是检出限的 50 ~ 100 倍时，误差 $<1\%$；5 ~ 10 倍时，误差 $<8\%$；

（3）基体效应小；

（4）线性分析范围宽，可达 5 个数量级；

（5）同时或顺序多元素测定能力强，分析速度快；

（6）可分析元素多，达 70 余种元素，对于常量和微量元素都可以测定。

由于 ICP - AES 的这些特点，使得其在考古学中具有很广的应用范围，在陶瓷、金属、石制品等文物研究中均可应用。另外此法所需费用适中，一经引进到文物产地研究中来便受到研究者的欢迎，至今仍是文物产地分析的重要方法之一。

三、化学成分数据的应用

（一）主量元素和微量元素的应用

主量元素和微量元素的概念来自地球化学。主量元素(Major Elements)又称为常量元素,一般是指在岩石或矿物中含量大于1%(或0.1%)的元素。微量元素(Minor Elements,Trace Elements),又称次要元素、稀有元素等,在岩石或矿物中的含量一般小于1%(或0.1%),其含量单位常以ppm(百万分之一)或ppb(十亿分之一)来表示。

应注意的是,主量元素和微量元素的区别只是相对的,因研究对象的不同而有所差异。比如,在地壳中被视为微量元素的镍,在陨石中则是主量元素,而在地壳中是主量元素的钾,在陨石中却含量甚微;一般说来是微量元素的锆,在锆石中却是主要组成元素。因此有人认为,微量元素应是在体系的任何相中都不作为主要组分而存在的元素。

对于少数几个主量或微量元素,常用来绘制某两个元素质量或摩尔含量的散点图,如图11.1所示;或是利用某些元素的质量或摩尔含量的比值来制作散点图,如图11.2所示。亦有将某类元素,如Na和K,Ca和Mg等的含量进行加和,然后绘制散点图的。利用这些散点图,就可以对样品之间关系的亲疏远近进行研究和判定。比如在图11.1和图11.2中,每一个数字都代表了一个陶瓷样品,其中1~10号样品来自A地,11~20号样品来自B地。从两个图中不难发现,A地和B地样品大体上分布在两个不同的区域内,两个区域之间基本上没有样品交叉。这种现象,意味着这两地样品所用原料的不同,也就是说,A地和B地样品的产地不同。

散点图的绘制简单,给人的印象直观明了,一直是文物产地和矿料来源研究的重要工具之一。但是,散点图所利用的数据量很小,所获得的样品的信息量也就要少得多,有时难以得到满意的结果。因此,要获得较全面的信息以得到满意的结果,必须同时对大量的数据进行分析。而此时,一般的数学分析方法已无能为力,必须借助多元统计分析的方法。

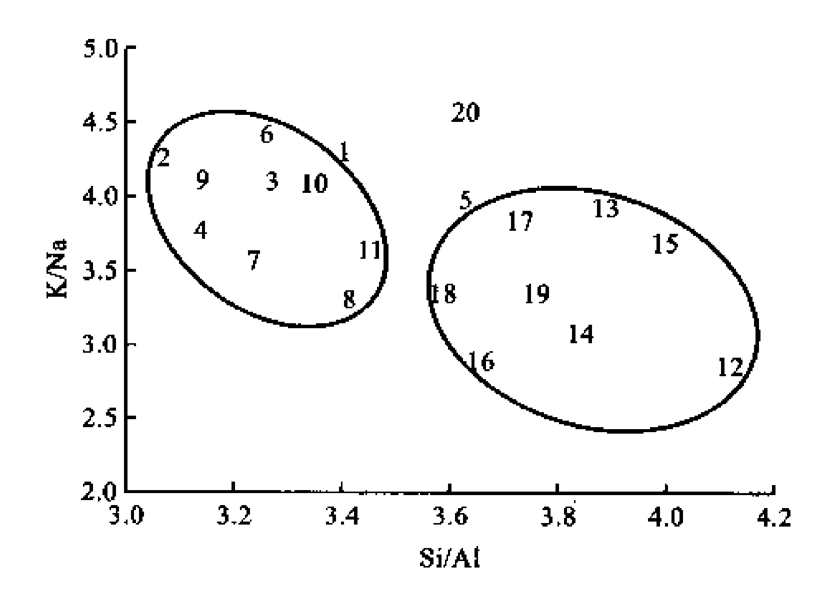


图 11.1 Si、Al 元素散点图

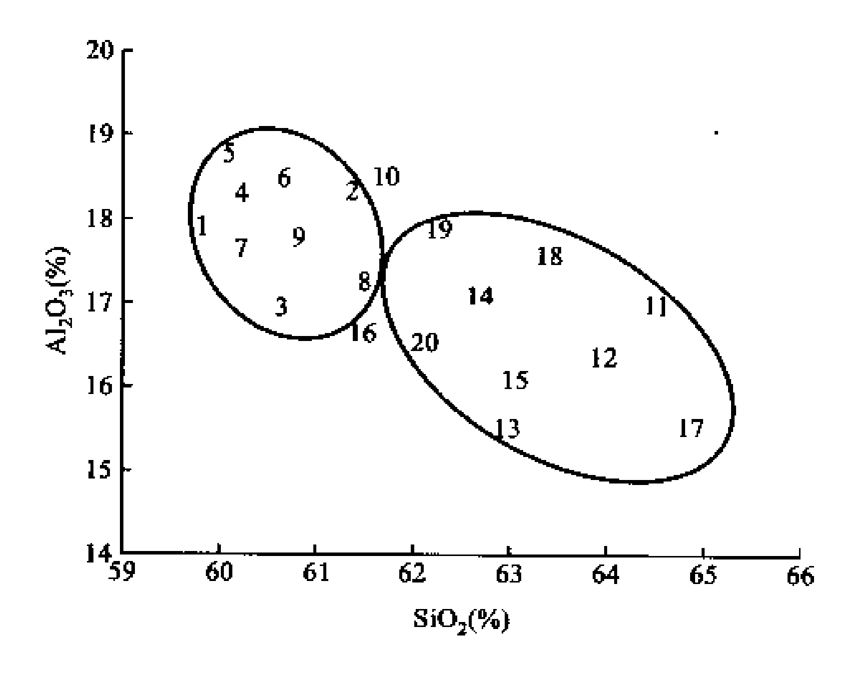


图 11.2 Si/Al、K/Na 比值散点图

(二)稀土元素的应用

稀土元素(Rare Earth Elements,REE)是指元素周期表中的镧系元素(57～71号元素)La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu,以及39号元素Y,总共16个元素。

镧系元素在元素周期表中占据一格位置,它们的电子层结构决定了其化学性质极其相似。在地质、地球化学作用过程中,它们往往作为一个整体活动,只要有其中的一个元素出现,其余的元素就会同时存在。不过,自然界中稀土元素的含量并不相同,各个稀土元素的含量比例也有一定差异,这是由一定的地质与物理化学条件所决定的。因此,稀土元素可以看作是一种良好的地球化学指示剂。通过对地质体中稀土元素的组成特点的研究,可以对许多地球化学问题如地壳、地球、月球的形成与演化,岩石的成因,成矿物质来源,成岩成矿条件等进行探讨①。而在古陶瓷产地研究中,稀土元素可用于指示陶瓷的产地信息。

在古陶瓷产地研究中,稀土元素常被用来做稀土元素球粒陨石标准化图解②。稀土元素球粒陨石标准化图解又称为稀土元素分布模式(REE Distribution Pattern,RDP)。以球粒陨石中稀土元素丰度的平均值为标准,以待分析样品中稀土元素的含量除以球粒陨石相对应的稀土元素的平均值,所得之值称为球粒陨石标准化值。然后以球粒陨石标准化值为纵坐标,以稀土元素的原子序数为横坐标作图,就得到RDP图解③。如图11.3所示,利用这个RDP图解,可以从中分析不同样品间曲线,以及各稀土元素标准化值的变化情况,以此来判断样品间关系的远近。如在图11.3中,A、B两个不同的样品,其稀土元素标准化曲线的走势完全一致,反映了这两个样品具有相近或相同的矿料来源。但两个样品的稀土元素标准化值却略有不同,表明其矿料来源又存在一定的差异。

稀土元素一般不适用于聚类分析。这是由稀土元素本身的特性以及聚类分析的特点所决定的。稀土元素具有特殊的、相似的电子层结构,决定了其化学性质的

---

① 徐光炽等编:《地球化学》,上海科学技术出版社1984年版;王中刚等编著:《稀土元素地球化学》,科学出版社1989年版。

② 徐安武等:《安徽蒙城尉迟寺遗址大口尊古陶器的稀土元素地球化学研究》,《稀土》1999年第3期;陈树榆等:《苏皖地区新石器时代陶器的稀土元素特征的初步探讨》,《中国科学技术大学学报》1995年第1期。

③ 刘英俊、曹励明主编:《元素地球化学导论》,地质出版社1987年版。

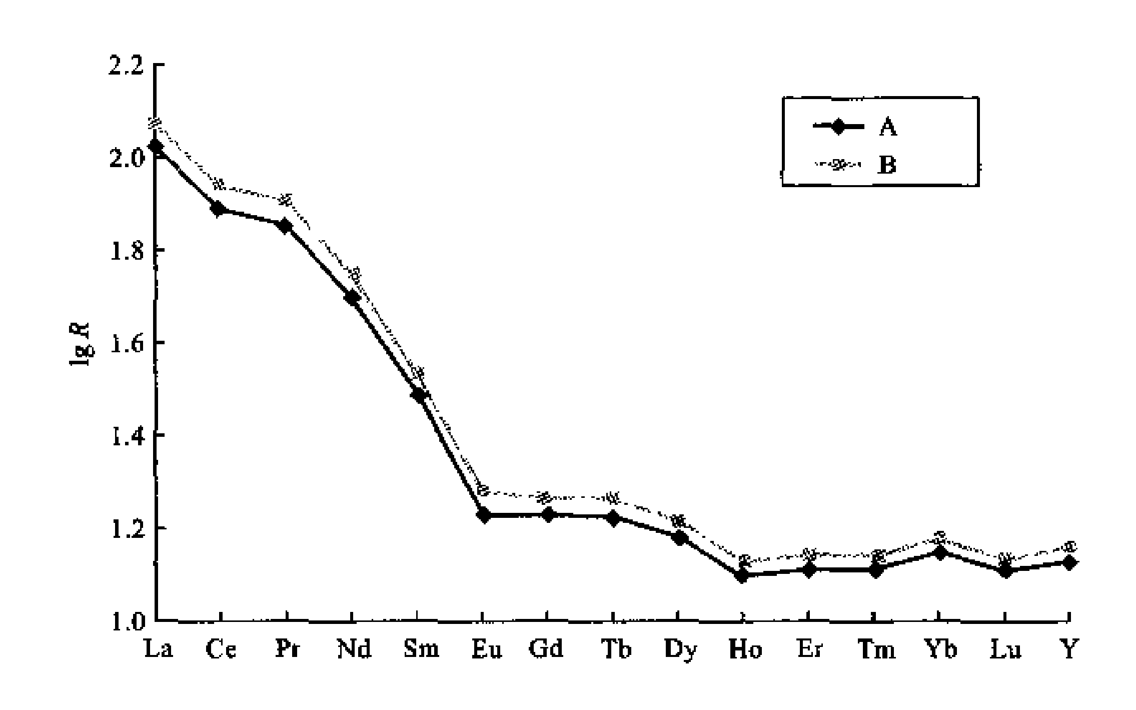


图 11.3 稀土元素分布模式图

极其相似性。在地质、地球化学作用过程中，它们往往作为一个整体活动，彼此之间具有很强的相关性，表现出"同增同减"的特征。而聚类分析无法消除所分析的变量之间的相关性。此时如利用稀土元素参与聚类分析，由于参与分析的各变量（不同的元素）在分析中所占的权重相同，这些相关性很大的稀土元素必然会掩盖其他元素所带来的信息，使其他元素对分析结果的贡献降低。不过稀土元素却可以被用来作因子分析。这是由于因子分析可以用较少的综合指标（随机变量，即因子）分别综合存在于各变量中的各种信息，而综合指标之间彼此不相关，即各指标代表的信息不重叠，消除了各变量之间的相关性。

四、铅同位素比值法

（一）铅同位素比值法的理论基础

地球上所有物体都含有铅。在自然界中，铅有四种天然同位素，即^{208}Pb、^{207}Pb、^{206}Pb和^{204}Pb。其中，只有^{204}Pb是非放射性成因的，它保持着地球形成之初时的丰度，不随时间改变。而^{208}Pb、^{207}Pb和^{206}Pb都是放射性成因铅，它们分别是^{232}Th、

^{235}U 和 ^{238}U 放射性衰变的最终产物，衰变过程如下

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{206}_{82}Pb + 8^{4}_{2}He + 6\beta^-$$

$$^{235}_{92}U \rightarrow ^{207}_{82}Pb + 7^{4}_{2}He + 4\beta^-$$

$$^{232}_{90}Th \rightarrow ^{208}_{82}Pb + 6^{4}_{2}He + 4\beta^-$$

在这些衰变系列中，有 12 种元素的 43 种同位素作为中间子体出现，但是没有一种同位素作为一个以上系列的成员出现，每一种衰变过程最终总是形成一种特定的铅同位素，如 ^{238}U 最终衰变成 ^{206}Pb ，^{235}U 最终衰变成 ^{207}Pb ，而 ^{232}Th 最终衰变成 ^{208}Pb。

自然界的铅按其成因可分为原生铅、原始铅、放射成因铅和普通铅。原生铅是指地球形成以前，在宇宙原子核形成过程中与铀、钍等所有元素同时形成的铅。其中 ^{204}Pb 的丰度较高，因此，在计算元素合成的年龄时，它有着重要的作用。

原始铅是指地球形成最初时刻所存在的铅。除原生铅外，还包括自元素形成到地球形成初期这段时间内，地球物质中所积累的放射成因铅。地球各部分原始铅的组成是否均一，取决于地球形成过程延续时间的长短。如果这一过程与地球年龄相比很短，那么地球各部分的原始铅同位素组成应该相同，反之则会有差异。通常以陨硫铁的铅同位素组成代表原始铅。因为在陨硫铁中，铀、钍的含量极低，它可代表天然物质中残留下来的原始物质。根据 M. Tatsumoto 等的资料，原始铅的同位素组成为 $^{204}Pb = 1$、$^{206}Pb = 9.307$、$^{207}Pb = 10.294$、$^{208}Pb = 29.476$。

放射成因铅是指地球形成以后，由于铀和钍放射衰变而形成的铅，包括 ^{208}Pb、^{207}Pb 和 ^{206}Pb。它们取决于矿物中放射性元素的多少和矿物的年龄。然而，放射成因铅往往在不同程度上受到普通铅的污染。

普通铅是指岩石或矿物形成时从周围介质中所获得的铅，而不是岩石或矿物本身所含放射性物质衰变形成的铅。原始铅也是一种普通铅。同一地质环境中形成的岩石和矿物应具有相同的普通铅同位素组成。通常专指方铅矿和钾长石中的铅①。

矿石铅通常由以下三部分组成：地球形成的最初时刻就存在的铅，即原始铅；

① 魏菊英、王关玉编：《同位素地球化学》，地质出版社 1988 年版。

地球形成以后，由铀和钍放射性衰变而形成的铅，即放射成因铅；在一定的成矿条件作用之下，铅从原来的岩浆体系（即原来的铀、钍体系）中脱离出来，形成了矿石铅。自矿石铅形成后，其铅同位素组成便从这时开始保持稳定。

对于矿石铅，其铅同位素组成可以下面的方程式来表达：

$$\left(\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}\right)_t=\left(\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}\right)_0+\frac{^{238}U}{^{204}Pb}(e^{\lambda_1 T}-e^{\lambda_1 t}) \quad (1)$$

$$\left(\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}\right)_t=\left(\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}\right)_0+\frac{^{235}U}{^{204}Pb}(e^{\lambda_2 T}-e^{\lambda_2 t}) \quad (2)$$

$$\left(\frac{^{208}Pb}{^{204}Pb}\right)_t=\left(\frac{^{208}Pb}{^{204}Pb}\right)_0+\frac{^{232}Th}{^{204}Pb}(e^{\lambda_3 T}-e^{\lambda_3 t}) \quad (3)$$

在上述各公式中，$(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$、$(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$ 和 $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$ 分别为现今矿物中分析得到的铅同位素比值；$(^{206}Pb/^{204}Pb)_0$、$(^{207}Pb/^{204}Pb)_0$ 和 $(^{208}Pb/^{204}Pb)_0$ 分别为原始铅的铅同位素比值；$(^{238}U/^{204}Pb)$、$(^{235}U/^{204}Pb)$ 和 $(^{232}Th/^{204}Pb)$ 则分别为目前地球内部某一特定的普通铅来源区中这些同位素的比值；λ_1、λ_2 和 λ_3 分别为 ^{238}U、^{235}U 和 ^{232}Th 的衰变常数；t 为矿石铅从来源区分离出来后所经历的时间，即岩石或矿物形成以来所经历的时间；T 是地球的年龄。

由以上公式可以看出，矿石铅的铅同位素比值，由原始铅同位素比值和放射性铅同位素比值所组成。原始铅在地球形成的最初时刻就已存在，而放射性成因铅则是在 $T-t$ 的时间内由铀、钍衰变而来。在铅脱离铀、钍体系形成矿石铅后，即 t 以后，矿石铅就不再获得放射性成因铅，因此，其铅同位素比值自此以后保持不变。在地球上，不同区域的矿床，其成矿时间一般不同，因面不同矿床的铅同位素比值通常也不相同，即不同矿床具有各自不同的铅同位素比值特征。

学术界一般认为铅同位素在矿石冶炼和金属熔铸过程中不发生分馏，青铜器等金属器物在铸成之后，仍能保留所用原料的铅同位素比值信息。因此，可以利用文物中的铅同位素比值数据，探索其产地与矿料来源。

（二）铅同位素比值的测定及数据的应用

同位素测定的仪器一般为质谱仪。其基本工作原理是："打碎"待分析试样，使之成为高速运动的离子（一般是正离子），再利用静电场和磁场将这些离子按不同质荷比（m/e）分离开来，依次记录在质谱图上，其质量坐标对应着化学成分，而

相对强度坐标可成为含量分析的依据。

具体说来，质量为 m，电荷为 e 的离子在 V 伏电位差的作用下，获得的能量为

$$E = eV = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

式(1)中，v 是离子的速度。因为所有离子被同一电位差 V 加速，所有具有同样电荷的离子将带着同样的动能从离子源出口缝射出。然而对于不同质量的离子来说，它们却具有不同的速度，即

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \tag{2}$$

当离子进入磁场时，它们就开始偏转成一圆形轨道。这个圆形轨道满足下列条件

$$Bev = m\frac{v^2}{r} \tag{3}$$

其中，B 是磁场强度，r 是轨道半径。从式(1)、式(3)消去 v，得到

$$\frac{m}{e} = \frac{B^2r^2}{2v} \tag{4}$$

在式(4)中，如果 B、r、V、e 分别以高斯、厘米、伏特和电子电荷为单位，m 用原子质量单位，方程就变成

$$\frac{m}{e} = 4.825 \times 10^{-5}\frac{B^2r^2}{V} \tag{5}$$

从方程(5)可解出 r 或 B，为方便起见，可以表示如下

$$r = \frac{143.95}{B}\sqrt{\frac{mv}{e}} \tag{6}$$

$$B = \frac{143.95}{r}\sqrt{\frac{mV}{e}} \tag{7}$$

在电压 V 一定时，欲将一个质量为 m、电荷为 e 的离子聚焦至管道半径为 r 的质谱仪收集器中，则根据方程(7)，可计算出所需要的磁场强度。而方程(6)暗示，无论调节加速电压还是磁场，都可迫使质量为 m、电荷为 e 的任何离子进入半径为 r 的轨道。方程(7)还表明，当 B 和 V 为常数时，单位电荷的离子轨道半径将正比于质量的平方根，即

$$r \propto \sqrt{m} \quad (8)$$

这就是说,质量大的离子,其偏转轨道大于轻离子,换言之,重的同位素比轻的同位素偏离其直线轨道更小一些,从而得以将质量不同的离子分离①。

质谱仪的种类很多,如有机质质谱仪、无机质质谱仪、固体质谱仪、气体分析质谱仪以及同位素质谱仪等。不同质谱仪分析的内容不同,其结构也有所不同,但大体都包括进样系统、离子源、质量分析器、检测器以及真空系统和数据系统等组成部分,如图 11.4 所示。

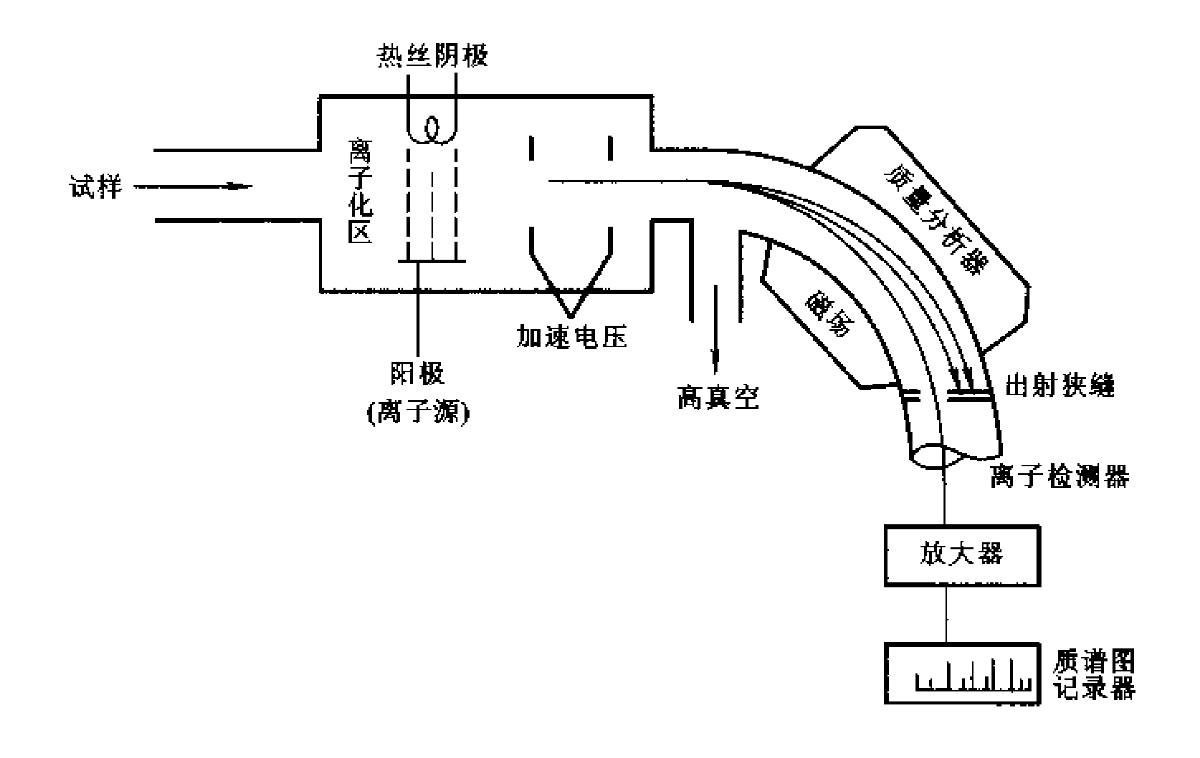


图 11.4　质谱仪结构示意图

真空系统:是质谱仪的重要附属部分,通常由机械泵和扩散泵组成,近些年常以涡轮分子泵代替扩散泵。它的作用是为离子源和分析器提供所需的高真空,一般需达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$帕。

① [美]G. 福尔著,潘曙兰、乔广生译:《同位素地质学原理》,科学出版社 1983 年版。

进样系统:质谱仪的进样系统有一个较为苛刻的要求,即样品进入离子化区域时,不能破坏或基本不破坏离子源的真空度。对于有机质谱仪而言,可将通常与之相连的气相色谱视为进样系统。至于固体样品,则可采用进样探头直接进样。

离子源:离子源是把样品分子(原子)电离成离子的装置。将样品离子化的方式有多种,如电子轰击、化学电离、场电离、块解吸、快原子轰击、激光解吸、电流体效应离子化、热喷雾离子化、电感耦合等。

质量分析器:位子离子源和检测器之间,可将离子源产生的离子按质荷比(m/e)的大小分开。质量分析器的种类也很多,常见的有单聚焦质量分析器、双聚焦质量分析器和四极杆滤质器等。

检测器:检测器通常使用电子倍增器。电子倍增器通常有 10 ~ 20 级,电流放大倍数为 $10^5 \sim 10^8$。电子通过电子倍增器的时间很短,利用电子倍增器可以实现高灵敏度和快速测定。除电子倍增器测定方式外,还有采用金属电极直接接收离子流,以电学方法记录的直接电测法,或使离子在照相板上感光,由辉度鉴定的光学方法等。

数据系统:该系统有数据采集、处理、打印等功能。经计算机处理测试数据后,可输出总离子流色谱图、质量色谱图、质谱图等①。

(三) 铅同位素比值数据的使用

铅同位素比值数据通常被用来作铅同位素比值散点图(图 11.5、图 11.6)。其中,以 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 的比值为横坐标、$^{208}Pb/^{206}Pb$ 为纵坐标的散点图,通常被称为 A 式图(图 11.5),以 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为横坐标、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 为纵坐标的称为 B 式图(图 11.6)。对所测样品中的铅同位素比值数据进行比较分析,可以判断样品的矿料来源之异同。而将所测定的数据与地质矿产数据进行比对,就可望确定其矿料产地。

此外,有学者通过对江苏新沂县花厅遗址出土的部分陶器测量其铅同位素比值后,认为用铅同位素示踪法可以有效地判别古陶器的产地。②

---

① 董慧茹主编:《仪器分析》,化学工业出版社 2000 年版。

② 张巽、王昌燧等:《花厅新石器时代古陶器产地铅同位素示踪的初步探讨》,《科学通报》第 42 卷第 6 期,1997 年 3 月。

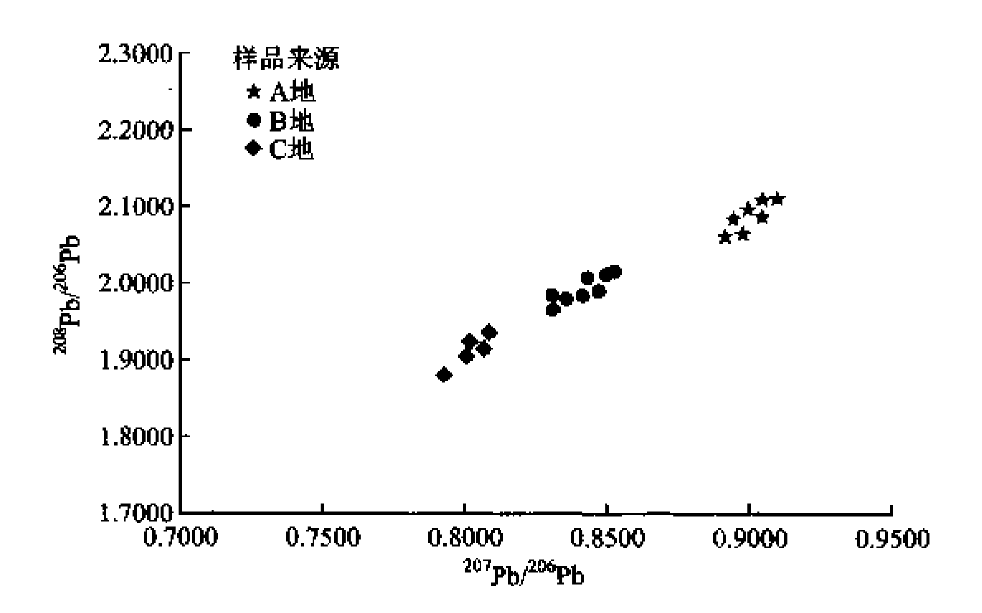


图 11.5 铅同位素比值散点图(A 式图)

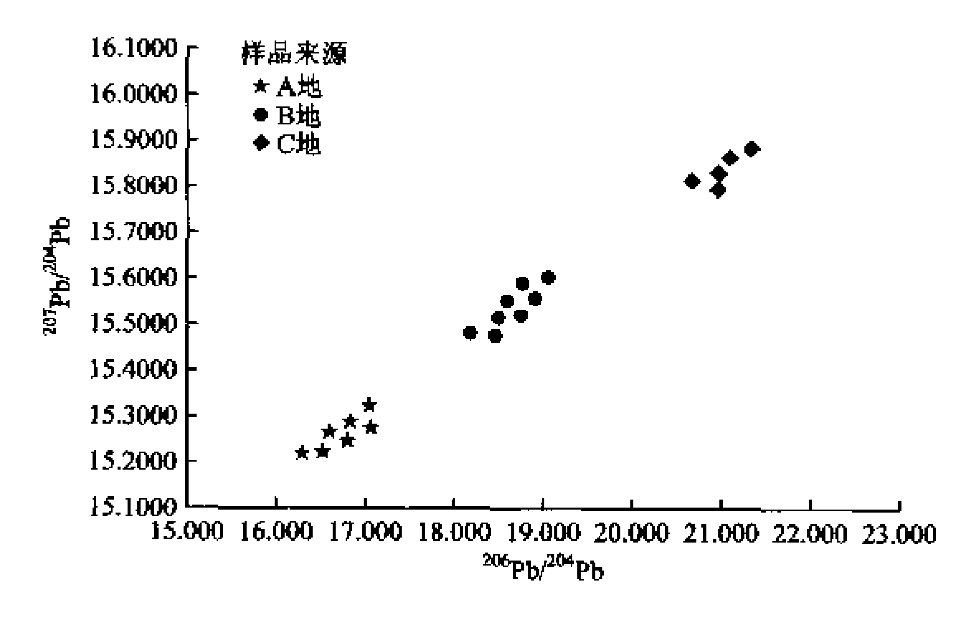


图 11.6 铅同位素比值散点图(B 式图)

采自李清临:《古青铜器矿料来源研究》,中国科技大学博士学位论文,2004年。

第三节　古代陶瓷与青铜文物的产地及矿料来源研究

古陶瓷器是古代先民大量制作和使用的物品，是考古发掘中最多的一种遗物，蕴含着丰富的文化信息。青铜器是人类最早大量生产的金属，它在人类社会发展史上曾起到过巨大作用。其他种类的文物如石器(包括玉器)、铁器等，虽然也是考古学研究的重要对象，但由于其原料的理化性质、制造的工艺技术等方面的诸多复杂因素，对石器、铁器等文物的产地和矿料来源研究，尚未有令人满意的方法与手段。因此，到目前为止，陶瓷和青铜文物是产地和矿料来源研究的主要对象。

一、古陶瓷产地研究的理论基础

古代陶瓷产地研究就是通过对古陶瓷化学元素特征大量数据的积累，从中选出反映地域性特征的微量、痕量元素及其含量，用现代陶器、源黏土进行对比，进一步推断古陶瓷的制作年代和烧制地点。

古陶瓷产地研究基于这样两个理论基础，或说是前提条件：其一，不同产地的黏土——陶瓷器原料——具有各自不同的化学组成，即黏土携带有其产地的特征，或说是“指纹信息”；其二，黏土的这些“指纹信息”能够基本完好地保存于其烧制产物——陶瓷器中，即原黏土的化学成分在烧制过程中不会发生变化。

(一)古陶瓷产地研究的地球化学基础

陶瓷器的主要原料是黏土。黏土是由基岩顶部的疏松母质岩，经过物理、化学、生物等的风化作用而形成的自然组合体。

由于成土过程中诸多影响因素的不同，各地黏土在矿物组成和化学成分上有很大的差别。这些影响因素包括：黏土成土母岩的类型、所在区域的气候条件、地形地貌、经历风化的时间等。由于黏土是由岩石风化所致，故成土母岩的类型对黏土化学组分的影响最大，其决定了黏土的主要矿物形式。此外，气候条件对黏土化学组分的影响也很重要。分布于不同气候带的黏土，其特征有很大差别。处于热带气候条件下的黏土，由于气温较高、降雨量大，加之强烈的风化淋溶作用，致使黏土中一些较活泼的元素很容易被水带走；相反，某些不活泼的元素却相对聚集。因此在温暖而又潮湿的气候条件下发育面成的黏土，其所含化学元素有淋失现象，这

与干旱地区的黏土明显不同。另外，地形地貌和风化时间对黏土组分亦有较大影响[①]。所以，虽然有时不同地区的黏土矿可能产生于相同或相似的地质背景下，但因其他影响因素的不同，使得黏土矿的成分有着或大或小的差异。

（二）化学元素在陶瓷器烧制过程中的变化

有关黏土中化学元素在烧制过程中的变化问题，前人曾经做过大量实验予以探讨。目前所知最早的研究，是波尔曼（Perlman）和阿萨若（Asaro）于1969年所做的工作。他们所用样品为标准陶土和自然黏土。研究表明，在烧制过程中，Br元素出现了挥发，即烧失。在这之后的1972年，波罗（Poole）和芬奇（Finch）发现S元素在陶器烧制过程中也存在着烧失现象。除S之外，Sr元素可能也受到温度的影响。1977年，艾特斯（Attas）等人进行了模拟实验，考察了19种元素在烧制过程中的变化情况。结果显示，这些元素在烧制过程中都未发生变化。次年，奥林（Olin）等人的烧制实验也证实，当温度低于1 000℃时，陶器中的元素基本不发生变化。不过需要指出的是，艾特斯和奥林等人所测定的元素中，Br和S元素并不在其内。1982年，雷（Rye）和杜尔登（Duerden）利用PIXE法分析了巴布亚地区的一种黑土，发现当温度升高至815℃时，Br、Cl和S元素含量明显降低。斯特利（Storey）在1988年的实验则表明Y元素在烧制过程中发生了变化。但因为其他稀土元素并未出现这种现象，故Y元素的这一变化尚难解释。1996年，克格斯威尔（Cogswell）等人采用俄亥俄红土标样做了烧制实验，并利用目前测试精度最高的中子活化分析方法，测定了包括常量、微量和稀土元素在内的34种元素在100～1 000℃内的变化规律。实验表明，在34个元素中，只有Br元素发生了烧失现象，其余33个元素均无变化。

综上所述，不同的研究结果之间虽然存在着一定的差异，但共同点却是一致的：在陶瓷器烧制过程中，某些化学元素会发生烧失现象。在曾经测定过的几十个元素中，Br、S两个元素在烧制过程中存在着烧失现象基本上可以明确，而Cl、As、Sb等元素则尚需更深入的研究。除此之外，黏土中的大部分主量、微量和稀土元素，在陶器烧制过程中均不会发生（显著的）变化。因此，在研究中，应避免选取那些存在烧失现象的元素，即Br、S元素；对存在疑问的元素如Cl、As、Sb等，也应尽量不要选取，而只选用其余那些在烧制过程中不会发生变化的元素，只有这些元素

① 王中刚等编：《稀土元素地球化学》，科学出版社1989年版；陈道公等编：《地球化学》，中国科学技术大学出版社1994年版。

才可以正确反映陶瓷器产地的信息。

（三）多种成分分析方法在古陶瓷产地研究中的应用

不同地区的陶瓷土的元素组成差异，特别是微量、痕量元素组成差异大于它们在同一陶土源不同部位的涨落①。中国古代瓷器原料就地取材，其中所含的微量元素种类不多，一般不影响瓷器质量，但可在瓷器中长期保存，从而成为分辨各地、各类瓷器的特征性指标。经中子活化分析不仅确定了古瓷中微量元素的古瓷窑窑系，分析了各处古窑的瓷土来源，瓷釉中元素含量的分布说明了原料配方上的差别。更重要的是利用中子活化分析的测量数据建立了各窑系、各瓷类的微量元素特征谱系，瓷类特征谱系因配料不同而形成，其中所含的元素和含量有明显差别，如宋代和明代浙江龙泉窑青瓷釉的特征迥异。

中国科学院上海硅酸盐研究所周仁院士等对我国古代陶瓷进行了系统的 X 射线荧光分析②，发现唐至明代的瓷器 SiO_2 含量在70%以上，Al_2O_3 在20%左右或以下，而清代瓷器的 SiO_2 都低于70%，Al_2O_3 却大于20%。有些研究者对唐三彩及东亚、东南亚、北非诸国的仿唐三彩通过 X 射线荧光分析法（用能量色散 X 射线分光仪、扫描电子显微镜对各标本测试）研究，得出中国器胎的低钙、中铁峰十分显著，而伊斯兰器胎的高钙、高铁峰非常明显，用这种迅速而非破损的方法辨别文物的不同产地或真伪比较理想③。

Hatcher 等人用原子吸收光谱法分析得出古希腊时代的黑釉陶器是由两处不同的黏土制作的，而陶器（包括有装饰和无装饰）的黏土来源是同一个地方的，云母质地的陶器也来源于几处黏土④。Hatcher 的研究表明，许多陶器构造、外形相似，但其用料并非完全相同。中外学者共同用原子吸收光谱仪就我国唐宋时期的陶片进行了分析，测出了9种主元素和微量元素，结果表明不同的窑口的产品其化学构成是不同的⑤。

瓷器是中国古代先民伟大的发明，是中华民族对人类文明的巨大贡献之一。

---

① 陈铁梅等：《荆南寺遗址陶瓷片的中子活化分析法溯源研究》，《"迎接二十一世纪的中国考古学"国际学术讨论会论文集》，科学出版社1998年版，第556页。

② 周仁等：《中国古代陶瓷研究论文集》，轻工业出版社1983年版。

③ 马文宽：《中国古陶瓷的科技研究》，《考古文物与现代科技》，人民出版社2001年版，第23页。

④ Hatcher H et al. Archaeometry. 1980, 22: 133.

⑤ Pollard A M, Hatcher H. The Chemical Analysis of Oriental Ceramic Body Compositions: Part I: Wares from North China. Archaeometry, 1994, 36 (1): 41–62.

瓷器起源于何时、何地，如何起源，是科技史与考古学关心的重大问题之一。有的考古学家从郑州等地发现的商代早期原始瓷断定，早在3500多年前的商代早期，中国古人就掌握了制作瓷器的技术，而且这些瓷器是在郑州地区烧制成功的①。

与此不同，另外一些学者则认为，瓷器起源于南方，是在几何形印纹硬陶技术不断发展的基础上产生的，商周时期北方的瓷器来源于南方。中国科学院上海硅酸盐研究所的研究人员长期致力于原始瓷产地的研究，他们最初由陕西长安沣西张家坡西周陶瓷碎片的研究开始，系统地测试、分析了中国古代陶器和瓷器的大量标本，并在此基础上建立了中国古陶瓷成分数据库和多元统计分析程序库，基本理清了中国陶瓷技术发展的脉络。

1960年，周仁等人通过对张家坡遗址陶瓷碎片的分析，发现这些碎片在化学成分上与北方青瓷有很大的差别，而与原始的"吴越青瓷"很接近。通过与安徽屯溪出土周代墓葬出土的青釉器标本做对比研究，他们认为从瓷胎的化学成分和矿物组成的显微结构等方面来看，张家坡等地出土的这类器物是由南方烧制的②。

李家治等人认为，中国南方从陶器开始，经过印纹硬陶、原始瓷到瓷器，它们的化学组成是逐渐变化的，而且相互交错（图11.7）。其中 SiO_2 逐渐增高，Fe_2O_3 和 CaO 逐渐降低。而北方的陶器和瓷器则分别处在两个互不相关的领域，和印纹硬陶、原始瓷的区域也互不相交，说明它们在化学组成上是没有关系的，而且北方瓷器 Al_2O_3 含量又远高于南方瓷器和原始瓷③。

罗宏杰等人从中国古陶瓷胎釉化学组成数据库中选取了144个南北方陶器与印纹硬陶的数据，对其进行多元统计分析。其分析显示，由北方陶器、原始瓷及瓷胎中 CaO 含量的变化特点可以看出，北方陶、瓷器胎的 CaO 含量都分别高于南方陶器及瓷器（图11.8、图11.9、图11.10），这一点似为北方陶瓷器胎质的组成特征，可以作为区分南北方原料及陶瓷的"特征元素"。然而，北方原始瓷胎中 CaO 的含量与陶器、瓷器不同，其中绝大部分与南方原始瓷胎基本相同（图11.10）。对瓷釉进行的分析也佐证了这一点（图11.11）④。

① 安金槐：《谈谈郑州商代瓷器的几个问题》，《安金槐考古论文集》，中州古籍出版社1999年版。
② 周仁等：《张家坡西周陶瓷烧造地区的研究》，《考古》1961年第8期。
③ 李家治主编：《中国科学技术史・陶瓷卷》，科学出版社1998年版。
④ 罗宏杰等：《北方出土原始瓷烧造地区的研究》，《硅酸盐学报》1996年第3期。

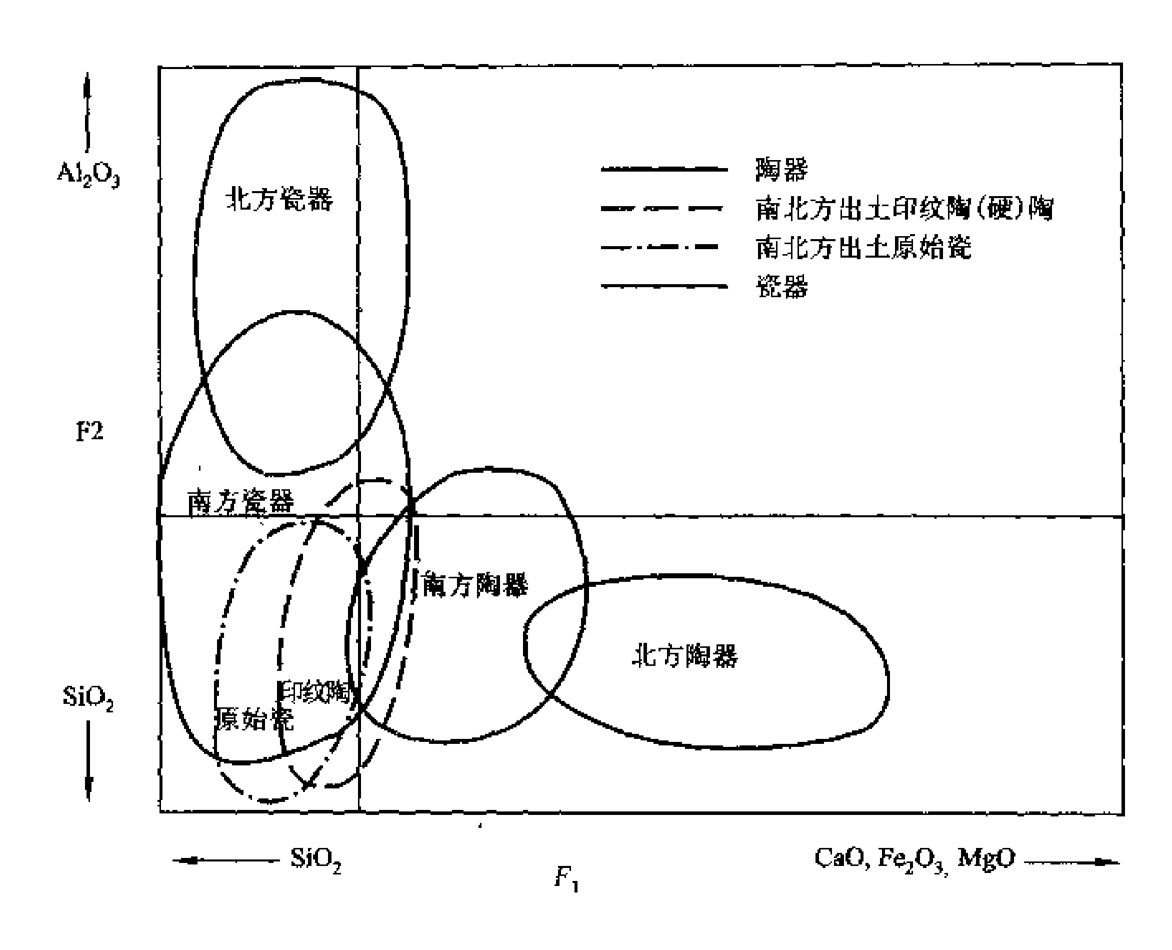


图 11.7　中国古陶瓷胎化学组成 F_1 和 F_2 因子载荷图

北京大学的陈铁梅等学者也对原始瓷产地进行了研究。他们从江陵荆南寺、郑州二里冈、小双桥、安阳殷墟、黄陂盘龙城、岳阳铜鼓山、清江吴城、陕西周原、张家坡和北京琉璃河等遗址选取一大批陶器、原始瓷器及印纹硬陶样品，作了中子活化分析(INAA)测试，取得 14 种测量值和统计值可信的元素，通过主成分分析和判别分析的方法，得到与李家治等人相似的观点，并且提出江西吴城及其邻近地区可能是当时原始瓷器生产中心、商代最晚期王室原始瓷来源出现了变更与多元化的观点。陈铁梅等人首次对中国原始瓷进行了微量和痕量元素组成分析，测试的原始瓷样品数目也是最多的，其成果产生了比较大的影响①。

① 陈铁梅等:《中子活化分析对商时期原始瓷产地的研究》,《考古》1997 年第 7 期。

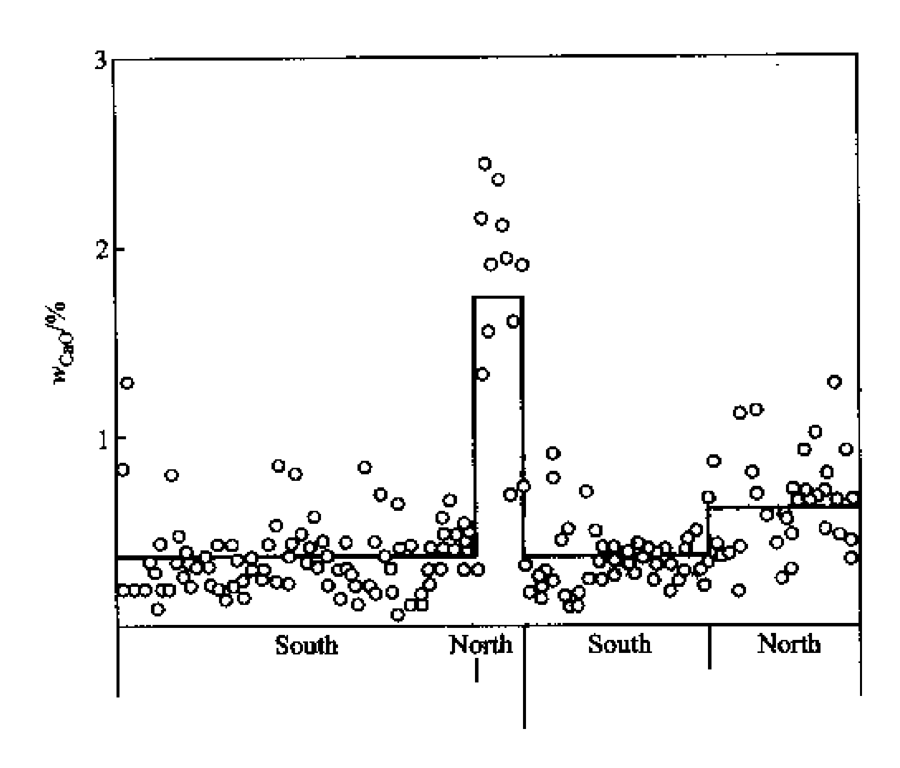


图 11.8　不同时期南北方陶器及瓷胎 CaO 质量含量变化图

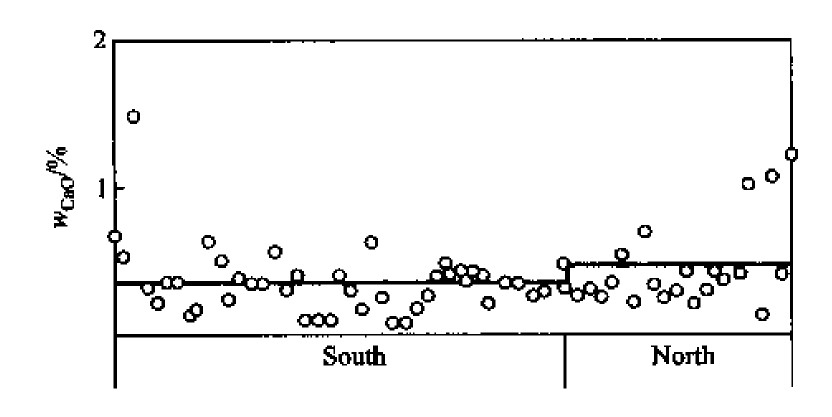


图 11.9　南北方原始瓷胎 CaO 质量含量变化图

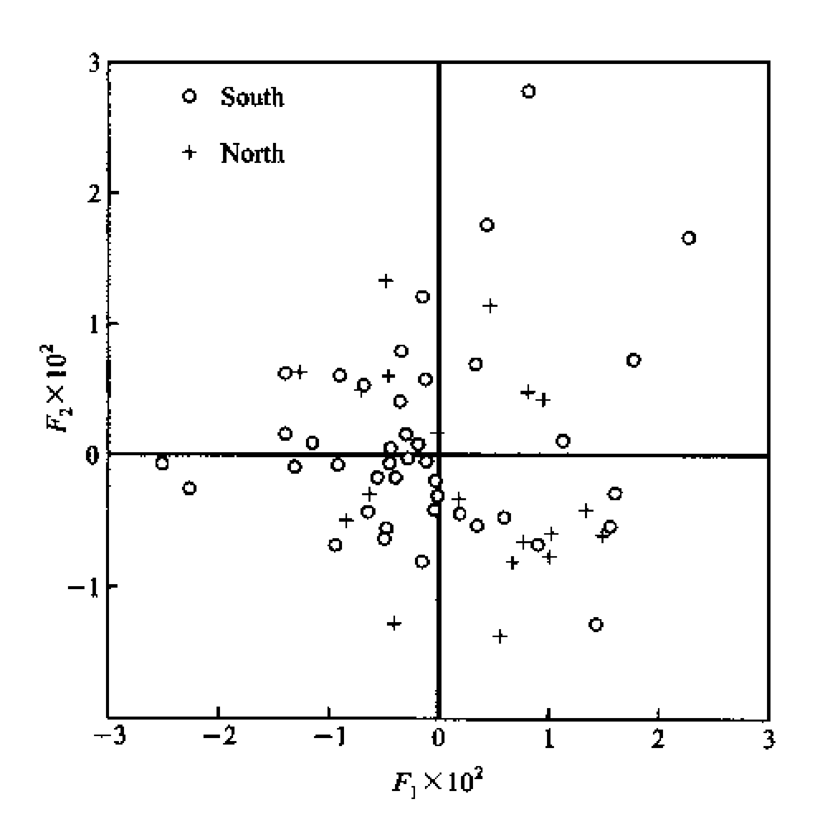


图 11.10 南北方出土原始瓷胎 F_1、F_2 因子载荷图

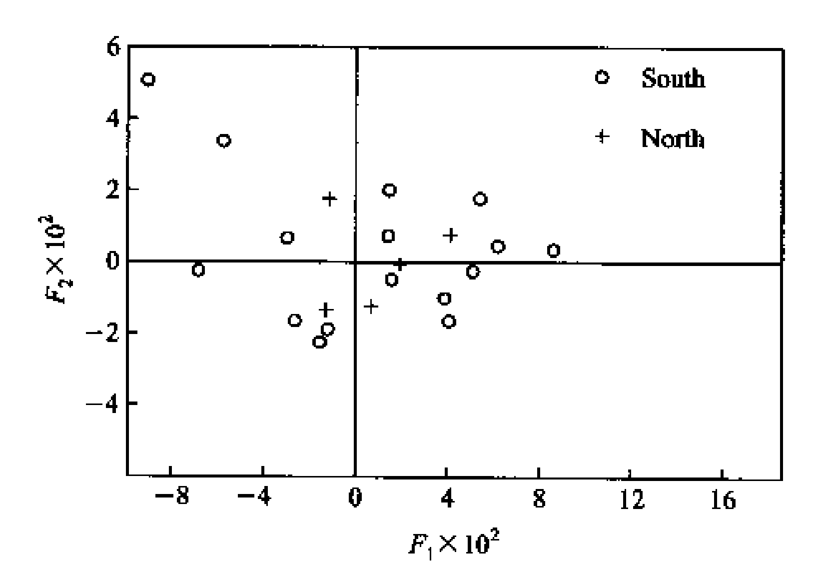


图 11.11 南北方出土原始瓷釉 F_1、F_2 因子载荷图

二、古代青铜器矿料来源研究

目前，对于古代青铜器矿料来源的分析主要依靠微量元素示踪法和铅同位素比值示踪法，主要分析对象集中在商周青铜器和有关的铜矿、铜料分析方面。

（一）用微量元素示踪法探寻古铜料源头

利用化学成分来探索文物的产地与矿料来源，青铜器与陶瓷器的情况有很大不同。在陶瓷器中属于主量元素的 Si、Al、Ca、Mg、K、Na 等元素，在青铜器中一般都属于微量元素，Cu、Sn、Pb 却成为了主量元素。在陶瓷器的产地研究中，主量、微量和稀土元素都可用于指示产地信息，而在青铜器中，则基本上只能利用微量元素来探索其矿料来源，因此利用微量元素来研究青铜器矿料来源的方法被称为"微量元素示踪法"。

在青铜器矿料来源研究中，并非所有的微量元素都可以选用。实际上，只有很少的几种元素适用。一般说来，青铜器与其所用矿料之间，在大多数元素含量上不具有明显的相关性。在冶炼过程中，由于地球化学元素之间亲和性的不同，铜矿石（锡和铅的矿石亦同）所携带的次量和微量元素有一个复杂的重组过程，即不同元素按照一定的比例重新分布于不同物相（铜金属、炉渣和蒸汽）之中。不难理解，通过这一复杂过程，筛选出在铜金属与矿石间具有相关性的特征元素，是微量元素示踪法所需解决的首要问题。另外，青铜是二元（Cu－Sn）或三元（Cu－Sn－Pb）合金，其微量元素组成应为铜、锡、铅原料所含微量元素的权重和，即与铜、锡、铅原料皆有关。因此，排除锡、铅原料带入微量元素的干扰，筛选出仅与铜矿料有关的特征元素，是微量元素示踪法所需解决的又一关键问题。只有解决了上述两个关键问题，才可能正确筛选出与铜矿料来源相关的元素，即"指纹元素"，使微量元素示踪法得以有效应用。

如上所述，在冶炼过程中，铜矿石的微量元素将有一个复杂的重组过程。冶金理论指出，元素的这种重组，主要取决于元素的地球化学性质。

根据化学元素在陨石各相或冶金产物中的分布规律，结合相关地球模型，戈尔德施密特（V. M. Goldschmidt）将所有元素划分为亲铁、亲铜、亲石、亲气和亲生物等五类。这就是元素的地球化学分类。这五类元素的特征是：

亲铁元素(Siderophile Elements):离子的最外电子层具有8~18个电子的过渡型结构。氧化物的生成热最小,易熔解在铁熔体中。主要集中在铁-镍相的地核中。

亲铜元素(Chalcophile Elements):离子的最外电子层具有18个电子($s^2p^6d^{10}$)的铜型结构。与硫的亲和力强,易熔于硫化铁熔体,故又称为亲硫元素(Sulphophile Elements)。主要分布在硫化物相中。

亲石元素(Lithophile Elements):离子的最外电子层具有2或8个电子(s^2p^6)的惰性气体型稳定结构。易熔子硅酸盐熔体中,与氧的亲和力强,又称为亲氧元素。主要分布在硅酸盐相的地幔和地壳中。

亲气元素(Atmophile Elements):原子最外电子层具有8个电子的稳定结构。原子容积最大,具有挥发性,或易生成挥发性化合物。主要集中在大气圈。

亲生物元素(Biophile Elements):主要为C、N、H、O、P、B等元素,一般富集在生物圈内。

以上各类元素的分类情况可以图11.12来表示。

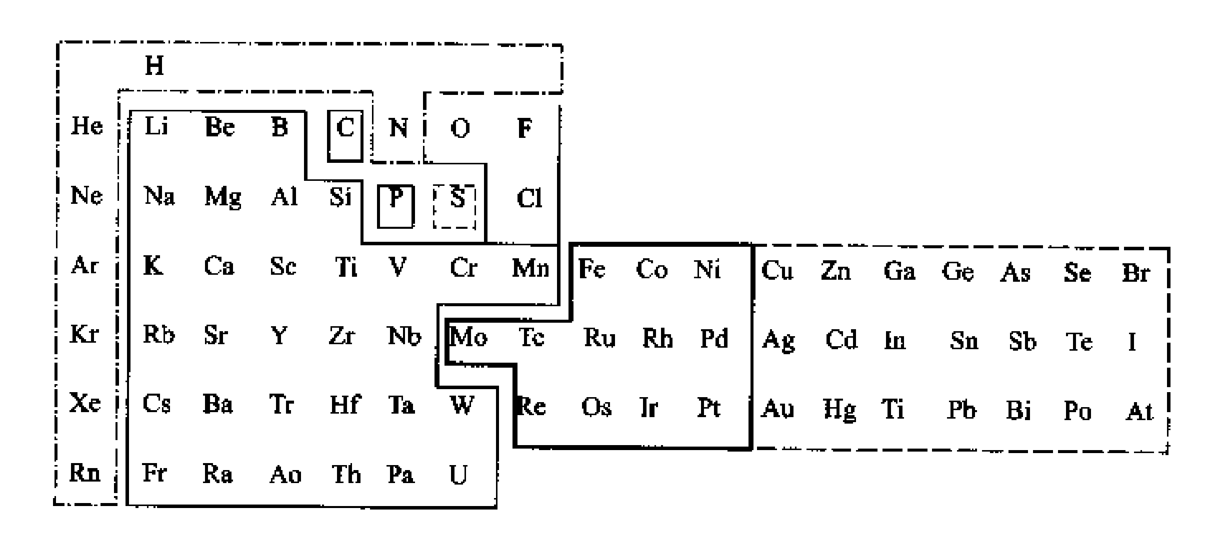


图11.12　戈尔德施密特的元素地球化学分类

注:粗实线为亲铁元素,细实线为亲石元素,虚线为亲铜元素,点线为亲气元素。

事实上,由子元素的亲和力与体系的温度、压力和化学环境等因素密切相关,

所以,某些元素的亲和力就有主、次之分,致使其地球化学性质复杂化,有时不能简单地归于某一类,而可以归于二类,甚至三类①。

为了探索微量元素示踪青铜器铜矿料来源研究的可行性,李清临、秦颖等采用仿古冶铸工艺,模拟浇注青铜样品,观察原铜矿料所含微量元素在青铜器冶铸过程中的再分配规律,较为成功地筛选出了具有指示铜矿料来源意义的微量元素。实验使用了已知不同产地的两个铜样品,若干锡、铅样品,经过一系列浇铸过程,得到系列铜、锡青铜、铅青铜及铅锡青铜的样品,选择出 Au、Ag、Ni、Co、Se、As 等六种在青铜样品与原铜矿料间具有相关性,并且受所加入的锡、铅料影响甚小的元素,利用多元统计分析软件进行了聚类和因子分析,结果如图 11.13、图 11.14 所示。

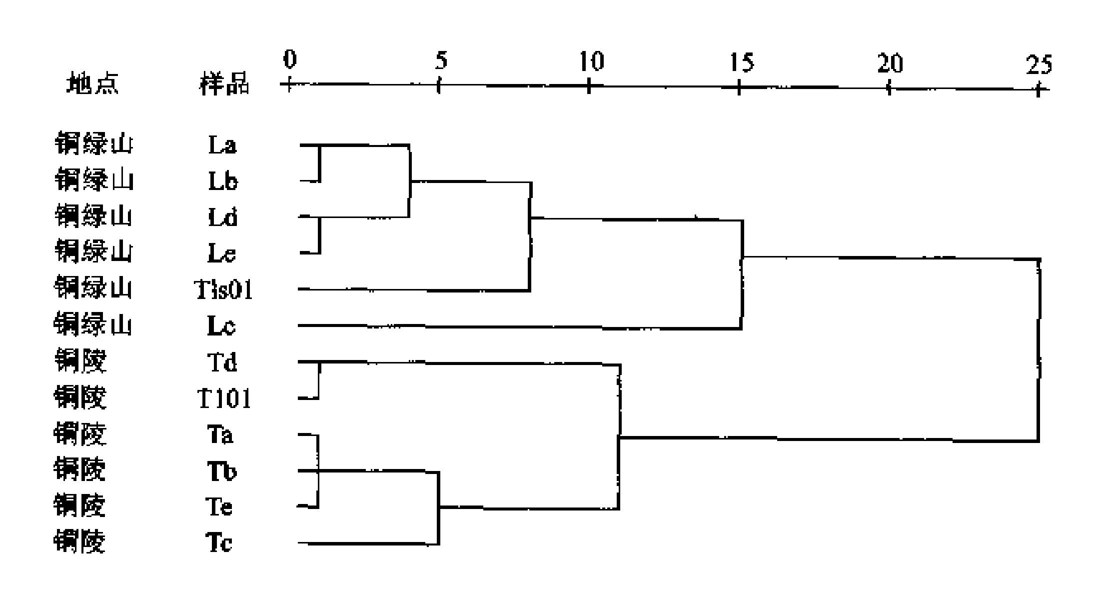


图 11.13 铜绿山与铜陵铜料和青铜样品聚类分析树形图

采自李清临:《古青铜器矿料来源研究》,中国科学技术大学博士学位论文 2004 年。

图 11.13 中,所有样品明显地分成两个大类,铜陵、铜绿山地区的冶炼铜料,都分别与各自冶炼的青铜产物聚为一类,两类之间无样品交叉现象。图 11.14 同样显示,两地样品也分别落在两个区域内,彼此间无样品混杂。据此,研究者得出结论:铜矿

① 陈道公等编著:《地球化学》,中国科学技术大学出版社 1994 年版。

石中的上述微量元素信息，能够较好地保存于其冶炼所得铜料以及其青铜合金中，那么保存于青铜器中的这几种微量元素，就能较好地反映原铜矿料来源的信息①。

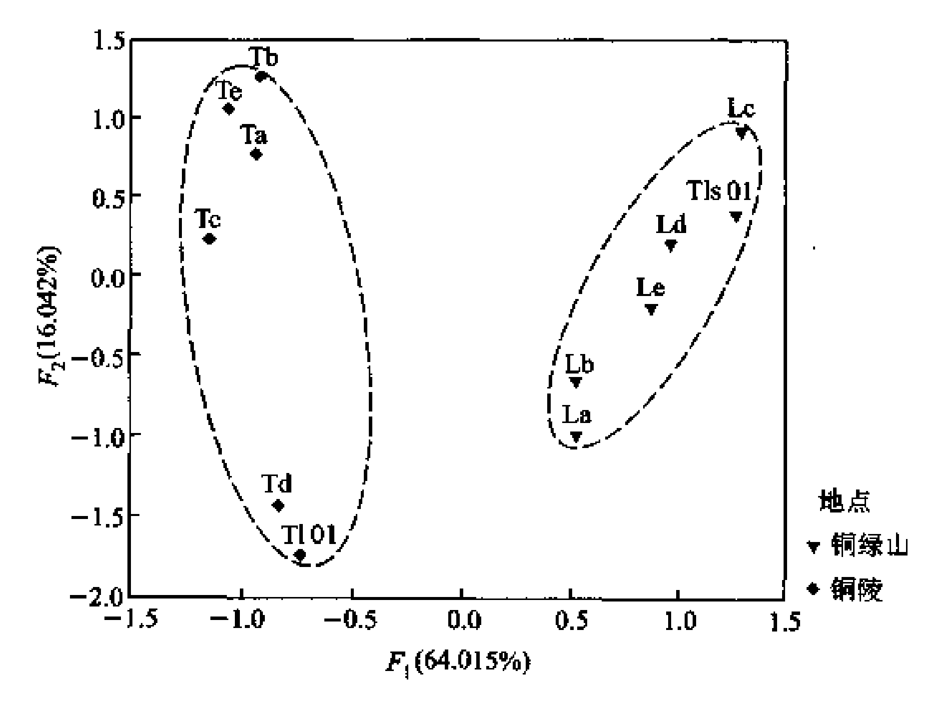


图 11.14　铜绿山与铜陵铜料和青铜样品因子分析散点图

采自李清临：《古青铜器矿料来源研究》，中国科学技术大学博士学位论文 2004 年。

（二）用铅同位素比值示踪法研究铜料源头

20 世纪 60 年代初期，铅同位素比值法被首次应用于金属文物的分析之中，对文物产地与矿料来源研究产生了重大而深远的影响②。此后，国内外的研究者利用这一方法，积极开展了对古代文物如青铜器、钱币、玻璃、颜料、大理石等的研究，取得了许多有意义的成果。目前，铅同位素比值法已成为青铜器矿料来源研究的主要手段。

日本出土的三角缘神兽镜，是古代中日两国经济、政治交往的重要资料。但这批铜镜到底是反映了何种形式的关系，中日两国学术界有多种认识。从镜的形制、

① 李清临：《古青铜器矿料来源研究》，中国科学技术大学博士学位论文 2004 年。

② Brill R H, Wampter J M. Isotope Studies of Ancient Lead. American Journal of Archaeology, 1962, 72: 63 - 77.

铭文和花纹图案看，它们具有中国铜镜的基本特征，故长期被认为是从中国输入的舶来品，称"舶载镜"，生产年代在汉末魏晋之际。有的学者推断它们的生产地在中国，是曹魏朝专门为日本邪马台国女王卑弥呼及其继承者制造的。由于中国和朝鲜半岛一直未发现同类镜子，有的学者认为它们可能是中国工匠在日本制造的。还有学者认为，这批镜铸有三国时代的魏国年号，又具有吴国铜镜的一些因素，可能系吴的工匠东渡日本利用魏国输入的原料所造。凡此种种，皆通过传统的器形学入手进行研究，各有一定的合理之处，但均无法彻底证明其说。对此，有日本学者尝试利用铅同位素比值法进行了研究，他们发现这类镜所具有的铅同位素比值，在日本找不到相应的矿源（方铅矿）。因此，他们认为这批镜属于中国制造，通过外贸途径输入日本的。虽然，这批三角缘镜到底是中国制造的成品输入日本，还是由中国工匠利用中国的原料在日本制造的尚不能完全确定，但用于铸造这批铜镜的青铜原料来自中国则是可以肯定的了。

徐人平等人进一步将数理统计方法应用到古滇铜鼓的铅同位素分析中。铜鼓最早发源于云南（或其他地区），流行于中国西南和岭南，并传播到整个东南亚，形成独特的铜鼓文化。早期铜鼓的矿料产地问题就成为破解铜鼓发源地及其所属族属问题的重要线索。由于铜鼓大部分是传世品，很难通过传统的方法研究，铅同位素比值法就提供了一条新途径。铅同位素比值的分布检验结果表明，云南万家坝型和石寨山型铜鼓接近，与广西麻江型铜鼓属于不同类型、不同的地理分布，前两者与后者的矿料来源不同，前两者的铜鼓矿料来源于云南本地，即最早的铜鼓矿料来源于云南。①

青铜器作为中国上古三代文明最显著的特征，是学者研究的重点。对商周时期中原王朝铸铜矿料来源的探索是青铜器研究的一个新领域。1984 年，中国科技大学的金正耀在国内首先运用铅同位素比值测定法对殷墟出土的 14 件青铜样品进行了分析和研究（表 11.1），发现其中 5 个样品属于铅同位素比值非常低的异常铅。这种铅在地质上称为高放射性成因铅，它与云南东北永善金沙石矿山的异常铅同位素比值特征一致，而与中国其他地区矿山的铅同位素分布场有很大的差异。该研究认为，上述 5 个样品的矿料来源为云南东北②。

① 徐人平、朱龙等：《数理统计在古滇铜鼓铅同位素考古中的应用》，《昆明理工大学学报》2001 年第 26 卷第 4 期。

② 金正耀：《晚商中原青铜的矿料来源研究》，《科学史论集》，中国科技大学出版社 1987 年版。

表11.1　殷墟青铜器铅同位素比值

序号	器类	出土地点	年代	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{208}Pb/^{206}Pb$
1	觚	殷墟妇好墓	商	19.23	0.803	2.007
2	觚	殷墟妇好墓	商	20.76	0.759	2.008
3	觥	殷墟妇好墓	商	19.94	0.771	2.005
4	觚	殷墟妇好墓	商	20.49	0.783	2.029
5	偶方彝	殷墟妇好墓	商	21.53	0.753	1.954
6	铜罐	殷墟妇好墓	商	22.50	0.750	1.933
7	残片	殷墟妇好墓	商	18.37	0.851	2.130
8	残片	殷墟妇好墓	商	17.53	0.871	2.131
9	残片	殷墟妇好墓	商	17.63	0.867	2.135
10	残片	殷墟妇好墓	商	18.74	0.847	2.106
11	爵	殷墟妇好墓	商	18.88	0.844	2.095
12	残片	殷墟妇好墓	商	17.51	0.872	2.150
13	箭镞	殷墟西区	商	17.69	0.897	2.192
14	残片	殷墟西区	商	17.20	0.889	2.179

采自金正耀:《晚商中原青铜的矿料来源研究》,《科学史论集》,中国科技大学出版社1987年版。

1986年,美国史密森研究院的E. V. Sayre等人公布了一批该机构所测的中国商周时期青铜器的铅同位素比值数据。在总共106件商代样品中就有数十件属于铅同位素比值较低的一类,即高放射性成因铅①。日本学者山崎一雄等人也测试了两件据说是属于商代的戟,均属于同位素比值很低的高放射成因铅。

金正耀等人又对广汉三星堆、新干大洋洲、金沙等地出土的青铜器作了同位素比值测定。千余个商代青铜器的铅同位素比值数据显示,河南安阳殷墟、郑州、江

① Sayre E V . The Technical Examination, Lead Isotope Determination and Elemental Analysis of Some Shang and Zhou Dynasty Bronze Vessels, 1986, Zhengzhou, China.

西新干、四川广汉三星堆和盘龙城等地青铜器具有高放射性成因铅，黄河流域和长江流域出土的高放射成因铅是一条铜料和青铜制品的流通路线——“青铜之路”。结合化学成分、锈蚀产物等其他手段的系统分析，发现殷商青铜器虽然出土地点相距较远，但均具有相似的铅同位素组成特征，目前中国大陆似乎不具有这样的铅同位素组成特征。而夏、周和周以后的青铜器可在中国大陆找到具有相应铅同位素组成的矿床（点）。① 根据这些结果，研究者们多倾向于认为，商代的铸铜原料中有相当大的一部分是来自云南地区的②。

此外，彭子成等人也用铅同位素示踪法测定了35件赣鄂豫地区商代青铜器和22个商周、春秋及现代的铜铅矿料样品。经对比发现，具有铅同位素中等比值的青铜器及其铜矿源主要来自江西瑞昌铜岭和湖北大冶铜绿山；在河南出现的铅同位素高比值的青铜器，其矿源可能来自商朝的北方地区，如河北、辽宁一带；铅同位素低比值的青铜矿料，可能与江西、湖南诸地区的浅成多金属铀矿床有关，这与武丁时期商王朝向南方开拓铜路的史料背景一致。③

当然，对以上观点仍然有学者持怀疑态度。这是因为，铅同位素比值法的本质特征决定了其局限性。这表现在：其一，虽然不同的成矿时间和成矿环境可以产生不同特征的铅同位素比值，但是也可能产生相同或相近的铅同位素比值，放来源不同的青铜文物中有可能出现铅同位素比值相近的现象。其二，古代铜器在冶炼、铸造的过程中，有可能将废旧器物回炉重熔，这就影响了新铸器物的铅同位素比值特征。

另外，对以往学术界所认为的铅同位素示踪古代青铜器原料产地的基本条件，即在矿石冶炼和金属熔铸过程中不发生分馏，青铜器等金属器物在铸成之后，仍能

---

① 金正耀：《铅同位素示踪方法应用于考古研究的进展》，《地球学报》第24卷第6期，2003年12月；常向阳、朱炳泉等：《殷商青铜器矿料来源与铅同位素示踪应用》，《广州大学学报》（自然科学版）第2卷第4期，2003年8月。

② 金正耀：《江西新干大洋洲商墓青铜器的铅同位素比值研究》，《考古》1994年第8期；《广汉三星堆遗物坑青铜器的铅同位素比值研究》，《文物》1995年第2期；金正耀、朱炳泉等：《成都金沙遗址铜器研究》，《文物》2004年第7期。

③ 彭子成、刘永刚等：《赣鄂豫地区商代青铜器和部分铜铅矿料来源的初探》，《自然科学史研究》第18卷第3期，1999年。

保留所用原料的铅同位素比值信息[①]，近来已有学者提出了新的认识，认为青铜器铅同位素的指示意义是不确定的，在冶铸过程中可能存在铅同位素的分馏。[②] 中国科技大学和湖北鄂州博物馆的实验研究表明，金属和矿物在一系列熔铸过程中，其铅同位素存在着分馏现象[③]。

青铜器等金属文物的矿料来源研究，目前尚处于初步发展研究阶段，需要从理论和实践方面继续深入地进行探索。

思考题

1. 试述文物产地与矿料来源分析的意义。
2. 文物产地与矿料来源研究主要有哪些方法?
3. 古陶瓷产地研究的理论基础是什么?
4. 试析铅同位素比值法在矿料来源研究方面的应用前景。

---

① 彭子成：《铅同位素比值法在考古研究中的应用》，《考古》1985 年第 11 期。

② 秦颍、王昌燧等：《青铜器铅同位素指示意义的范铸实验研究》，《文物保护与考古科学》第 16 卷第 2 期，2004 年 5 月。

③ 李清临等：《青铜器重熔对铅同位素比值的影响》，东方地区文明化进程国际学术研讨会论文，2003 年。

第十二章
生业考古

考古学的研究目的是探寻人类社会的发展规律，其研究内容涉及人类物质生活和精神生活的方方面面。食物的生产是人类最基本的活动，是人们从事其他生产活动的基础和前提，不同的食物生产形态必然导致不同的生活方式和文化形态。从某种程度上讲，人类文明的演进史就是一个不断提高食物获取能力、改进食物加工方式的过程。人类的食物主要来源于自然界的生物，包括动物和植物。因此，对古代人类食物类型、食物资源及其生产方式以及与之密切相关的自然环境的研究均是考古学研究的重要内容。由于这些方面的内容均属于人类生业范畴，我们暂且将其统称为"生业考古"。

生业考古的研究内容很广，与古代人类基本生活方式相关的生产资料和生产领域均可归入其研究范畴，如农业、手工业、建筑、动物、植物、矿物等。作为科技考古的一个重要方面，生业考古的研究目标是，利用自然科学理论与方法从考古遗存中提取有关古代生业方式的资料和信息，并在考古学和各相关学科的理论指导下，复原古代人类的生活面貌并探讨人类生业方式、生产内容及其与自然环境的关系。由于考古学所关注的人类历史时段通常限于工业社会以前，特别是史前和历史时期早段，而那个时段内人类的精力主要放在了获取食物以保证种群延续的活动上，所以本章有关生业考古的内容仅涉及动物、植物、食性，以及与之相关的气候、地理环境等几个最基本的方面。

第一节 自然环境与人类文化的关系

自然环境是人类赖以生存的客观条件，它对人类及其文化的产生与发展起着极其巨大的作用，有时甚至是决定性的作用。与人类活动密切相关的自然因素包括气候、地形地貌、植被、动物、土壤、水系等。以下择其重要者简要说明。

一、气候

在所有影响人类生活的自然环境要素中，气候是最为活跃的因子，它不仅直接影响人类的生产和生活，还通过影响动物、植物、土壤等自然环境要素而间接影响人类。例如，气候决定了地球上什么地方适宜人类居住，影响到人们的居住方式和衣物类型。气候决定了草原、森林、荒漠的范围，决定了什么地方适宜耕种农作物而什么地方只适宜畜牧业。气候的变化可以造成植被水平地带和垂直地带的变化，从而引起生存于其间的动植物的变化；气候影响到哺乳动物的分布范围。特定的植物和动物种群又继而影响到人类的生存空间和范围，影响着人类的生产活动和生活方式。气候直接并通过参与土壤的形成而影响到农作物的种类和耕作方式。

研究人类与环境的关系，一般从第四纪开始。这是因为，开始于距今约 260 万年左右的第四纪是地质历史上最晚近的一个时期，这一时期地球上发生了天翻地覆的变化。其中最为重要的变化是气候的剧烈变化、十分活跃的地壳运动和与气候变化直接相关的冰川的形成或消融，以及由这些变化所引起的地貌、土壤、动植物种群的变化。尤为重要的是，人类的出现及其繁荣成为第四纪里的一个重要事件，它也是一系列地质与气候巨变的直接结果之一。

第四纪时期，由于全球气候发生急剧变化，交替出现了寒冷潮湿的冰期和温暖的间冰期。冰期时，地表水大规模结冰使海平面降低，因此使大部分浅海大陆架转变为陆地。由于气候的大陆度增强，导致森林面积缩小和干旱草原植被扩展，北半球黄土的分布区是半荒漠、干草原植被区。与此同时，适应于半荒漠、干草原环境的哺乳动物分布范围扩张，典型的动物野马、野牛、羚羊、大角鹿、赤鹿和狼活跃在其中。而在冷湿的冻土苔原地区，出现了喜欢寒冷的动物，如在中国东北地区、俄

罗斯的西伯利亚和靠近极地的其他地区出现了猛犸象。冰后期的温暖湿润气候为人类农业文明的发展提供了机会并给予影响，人类有可能驯化植物、驯养动物，开始农业定居生活。早期的农业生产水平低下，人们刀耕火种，广种薄收，为了生存，大量开垦土地，使得大片天然植被遭到破坏。在中国的西周中晚期，古人已不断地对冰后期以来气候回升形成并发展起来的原始森林和草原等植被进行了毁灭性的开发，导致了当地小气候的变化。秦汉时期在西北地区的移民屯垦和北方游牧民族的多次南下破坏了这一地带的原始植被，造成水土流失，河水泛滥[①]。汉代以后类似的破坏趋势更加明显。

气候特点是由纬度位置、海陆位置、地形、大气环流这些因素综合影响而形成的。对气候的研究，可通过与之紧密相关的因素来分析、复原。

（1）沉积地层和土壤的结构可以显示气候变化。在非洲、北美西部和中国西北荒漠半荒漠地区，第四纪沉积物剖面呈湖泊沉积层—黄土层—风沙层的多次反复更替变化，清楚地说明了当时气候的变化。而中国黄土高原大面积巨厚的风成黄土、黄土沉积地层正是气候变化影响、西北荒漠强度和土壤发育的良好记录。目前通过对黄土剖面的研究已恢复了 250 万年的变迁。我国学者刘东生、王永焱、张宗祜、安芷生等人通过野外考察分析，认为中国黄土完整地记录了第四纪 248 万年里气候的变化，其序列比欧洲、美洲黄土气候记录要长、要完整得多。通过对深海沉积层中有孔虫化石氧同素的分析、湖泊沉积物的孢粉分析以及树木年轮的分析可看出 250 万年中气候变化有 10 万年、4 万年、2 万年等周期。

（2）根据历史文献的记载，结合树木年轮的宽度、密度恢复气候。如我国东部历史时期的气候变化已基本清楚。

（3）各种生物遗体反映其生长环境。不同气候环境下有不同的动植物，或喜暖、或好冷，根据这些古生物的分布来推测当地当时的气候。我国著名科学家竺可桢利用古遗址中的动物遗骸研究了我国近 5000 年来的气候变化[②]。他根据西安半坡仰韶文化遗址中出土的水獐和竹鼠、安阳殷墟出土的象、圣水牛、竹鼠等热带和亚热带的动物群，而现在华北已不存在，推断出当时气候比现在温暖。又结合甲骨文记载豫北地区求雨春播时间相当于今阳历三月间（比现在当地春播早一个

① 文焕然、文榕生：《中国历史时期冬半年气候冷暖变迁》，科学出版社 1996 年版，第 148 页。

② 竺可桢：《中国近五千年来气候变迁的初步研究》，《考古学报》1972 年第 1 期。

月），武丁时田猎可获象，证明黄河中游较现在温暖。还根据山东历城龙山镇龙山文化遗址曾出土炭化竹节，陶器也有竹节装饰，证明整个黄河中下游的气候比现在温暖，气温估计比现在高2℃左右。

植被是自然界中最灵敏的气候变化指示物，科学家们根据孢粉和气候之间存在着统计学上的某种相对稳定的数量关系，建立了花粉一气候因子转化函数①。

二、地貌

地貌是地球表面的形态，是人类环境的重要组成部分，是气候起作用的媒介。海洋和大陆是最大的地貌单元，大陆内部、山地和平原是次一级的地貌单元，更次一级的地貌单元是河谷、冲积扇、沙丘等。不同的地貌单元是不同自然资源赋存的空间，不同的自然资源又影响到人类采用不同的生业模式，因此，要深刻地理解考古学文化，就必须对区域调查范围内的地貌特征有所了解。

古往今来，人类的任何生产活动，从采集、狩猎、捕鱼、种植、放牧到建筑房屋、修路筑桥、修造城池等，无不根据当时当地的地貌条件来决定。由于人类早期活动主要是在陆地上进行的，而河谷、盆地、草原及河流的三角洲等地貌单元因为有着丰富的动植物资源，且较易于为人类开发成农田而成为人类生活的沃土，为人类的发展壮大和文明诞生奠定了物质基础。反之，高山、丘陵、荒漠地带则难于提供人类所需的多种动植物资源，不宜人类居住，因而成为文化的贫瘠地区。

从历史的角度看，任何一个地区的地貌地形都是比较稳定、缓慢变化的。如果没有气候和构造运动的变化，地貌不会发生根本性的变化。地貌的发育具有继承性，如处于地表沉陷处和干旱气候条件下的塔里木盆地，在第四纪虽然有冰期—间冰期的变化，发生过湖泊扩张或消亡、沙漠扩大或缩小，但始终保持着荒漠地貌的总特点，各种现代荒漠现象只是过去荒漠过程的继续和发展。

地貌的变化由内力和外力决定。内力主要指地表运动、火山活动、地震等自然力量，这些自然因素的力量非常惊人，它们会毁灭自然堆积层和人为堆积的文化层。外力主要指风沙、流水、冰川，外力作用的演变通常会被沉积物记录下来。通过分析沉积物层和沉积层相可以了解当时的沉积环境和沉积物成因。我国北方旱

① 宋长青、孙湘君：《中国第四纪孢粉学研究进展》，《地球科学进展》1999年第4期。

更新世沉积层中的标准动物群为泥河湾动物群，中更新世是周口店动物群，晚更新世为萨拉乌苏动物群，全新世是安阳殷墟动物群。此外，人类的生产活动会改变地貌地形，如开挖渠道、壕沟使地面局部凹陷，而建筑和垃圾的堆积则使地面上升。人类活动范围区的地貌变化是在人力和自然的双重作用下形成的，从中可看出人对自然的依赖程度和对自然的改造力。

不同的地貌、地形提供给人们多样的生存条件，山地、荒漠、沼泽是人类最不愿选择的生存地，河谷、平原、草地是人类的首选地。依据土质、气候特点，人们或穴居、地面盖房或住在干栏式建筑中。即便是史前人类，对居址都经过严格选择，绝大多数居址依山傍水，坐北朝南；后有低山丘陵，前有流水和宽阔的平原，以利其采集或狩猎、饮水和安全。另有一些居址则选择在大、小河流的交汇处。窑洞式住宅流行于陕西、山西北部，在河南西部、甘肃东部及宁夏等地也较普遍。它具有节约资源、易于建造、对环境破坏程度小、居住舒适（冬暖夏凉）等优点，是早期人类较为理想的住宅类型。考古发掘结果表明，早在新石器时代，陕西（案板、客省庄、赵家来、石嘴头、双庵）、甘肃（镇原常山下）、宁夏（海原菜园）、山西（襄汾陶寺、石楼岔沟、太谷白燕、曲沃方城）等地已出现了窑洞式房屋，已知最早的例子是在甘肃宁县阳坬遗址 F10，其时代相当于仰韶文化晚期。这是黄土地带的人们适应黄土高原沟、梁、塬、峁地形地貌，利用黄土直立性好的土质特点面创造出来的居住风格。中国南方地区气候多雨，河湖汊港密布，地势低而潮湿。适应这种地形和气候环境的建筑就需要在防水、防潮及防虫等方面加以考虑，于是产生了干栏式建筑。无论是在黄土层内掏挖的窑洞还是在水上建筑的木质干栏结构，均是该地区人们适应环境、利用地形条件的结果。

普通民居的选址如此，大型的公共工程也是如此。中国古人很早就总结出建造城池时选择地理地形的原则，《管子·立政篇》说："凡立国都，非于大山之下，必于广川之上。高毋近旱，而水用足；下毋近水，而沟防省。"

只要人们的生业方式、生存环境不发生大的变化，建立在其上的思想、观念和习俗就会延续下去，并反作用于客观环境。因此，人类选择居住环境的意识具有传承性。例如，陕晋黄土高原地区的住宅建筑仍然保存着窑洞的形式，只是材质与装饰有所更新。与以往人们在自然形成的断崖上掏挖的方式有别，现代人们通常使用砖、石等材料，在平地上堆砌（箍）窑洞。

三、自然因素与人类活动的关系

俗语云：一方水土养一方人。如前所述，自然环境因素与人类文化的关系非常密切。这种密切关系表现在自然因素作用于人类（文化）和人类（文化）反作用于自然因素两个方面。

（一）自然环境对人类的影响

自然因素对人类及其文化的影响体现在以下两点。

首先，自然因素制约着人类活动的时空范围。人类的生存有赖于大自然的赐予，有些地区适宜于人类居住，如植物、动物资源丰富且气候条件较好的温带、亚热带地区。另一些地带则不适宜于人类（以及部分生物）生存，如过于干旱、过于潮湿的地带，植被稀疏、动物种类和数量较少的沙漠地带，气温特别寒冷或炎热的地带，地形崎岖、交通不便的地带等。世界上最重要的几种古代文明和现代最发达的人类文明，其分布的地域范围几乎全位于当时气候条件适宜的温带和亚热带草原地带。

中国龙山时代末期，曾经辉煌一时的良渚文化、龙山文化、石家河文化等突然衰落，可能是由于气候变化所引起的洪水破坏了这些文化的生存环境，导致当时的人类不得不迁往异乡他处。中原龙山文化则以黄河中游低山丘陵盆地为根据地，这种地形条件利于人类抵御大规模的洪水，因而能在大灾之后迅速恢复生产，其文化非但没有中断，反而可能在抵御自然灾害方面积累了生产经验，锻炼了组织能力，从而脱颖而出，最终成为中华文明的领跑者。尽管人类的生存范围随着生产力的不断发展而逐渐扩大，但并不能改变人地关系的基本形式。

其次，自然因素影响着人类及其文化的形态。环境影响乃至决定着人类的生存方式。当一个生态系统水热条件良好，且平原、低山、丘陵、湖泊等景观并存时，生活在该系统的人们便可耕、可牧、可渔、可猎，这就与早期人类的多元性经济有了更多的相宜性；如果该系统还有纵横交错的河流、道路、沟谷等景观廊道时，则更有利于系统内外的物质流、能量流、信息流的传输。黄河中游的土壤宜于粟、麦类农作物生长，长期稳定的农业产出为文化的持续发展提供了物质保障，并塑造了中华文明的主要特征——连续性发展、重农抑商。与生态环境较稳定的地区不同，生态过渡带敏感易变的环境背景，客观上也有利于早期人类驯养、栽培优良品种。这种

景观异质性强、边缘效应显著的生态系统可能会更有效地促进人类社会的进步①。以河南舞阳贾湖遗址为例，该地处于黄河、长江两大流域的过渡地带——淮河流域，贾湖人时期，当地有大面积的沼泽，降水充沛、日照充足，四季气候分明，有野生稻资源。在此环境下，贾湖先民与长江流域的古人类完成了稻种的优化选育。此外，广阔的草原利于狩猎、畜牧，路生、水生可食植物可供采集。在这样的生态环境中，贾湖人的文化具有自己的特点：龟灵、太阳、鸟神崇拜盛行。②

总之，时代越早，自然因素对人的影响越大，人类对自然环境的依赖就越强。国外有很多学者甚至认为，自然因素决定着一个文化的形成。另外一些学者虽然更重视和强调人的能动性（即社会、人的因素在文化形成与发展过程中占主要地位），也不否认自然环境对人的巨大影响。现代社会，在人类利用、改造自然的能力已经大大增强的情况下，其生产和生活仍然无法脱离自然环境因素的制约，地震、海啸、飓风、洪水、干旱、沙漠化均是无法抗拒的因素。环境的变化促进了人类的演化和文化发展。因而任何一种文化都必然适应当时当地环境，只是适应的程度与方式因自然环境变化的状况和社会发展阶段的不同而有别。

在生产力低下的史前时期，人类在大自然面前的能力有限，只能利用现存的条件。当生存环境恶劣时，人们只好迁徙，寻找新的合适的生存区域。也许正是由于这种变化，人类才开始逐渐地调整自身的行为以适应新环境。我国龙山时代的遗址分布表明，原先相对发达的中心区普遍衰落，许多新的地区特别是原来的河湖沼泽的低地被开辟利用，存在于仰韶时期各文化区之间的空白和缓冲区域迅速消失。这是因为龙山时代人类的生存环境有所恶化，虽然有仰韶时期原始落后的农业生产方式对某些地区过度开发，打破了区域内生态平衡的因素，但更主要的是自然环境达到最佳状态之后，已开始向另一方面转化，其幅度未必很大，但在人地关系既有的饱和稳定模式下，则严重削弱自然界恢复平衡的能力，并毁坏了某些地区旧有的生态资源。另外，河流的下切、新的河流阶地（北方各河流的一些阶地此时开始出现，直到秦汉时期逐渐稳定下来）、冲积平原与河口三角洲的发育、干涸的沼泽等，又提供了新的比较适宜的居住场所。在这种情况下，各考古学文化重新分化、

① 宋豫秦：《生态过渡带之人地关系刍议》，《环境考古研究》（第2辑），科学出版社2000年版。

② 河南省文物考古研究所编著：《舞阳贾湖》（下卷），科学出版社1999年版，第824—835页。

组合，其中心当是对生存资源的重新分配和瓜分①。

（二）人类对自然环境的影响

人地关系的另一面是人类对自然环境因素具有反作用，即人类在被动适应自然环境的同时，也选择和改造环境。人类对自然资源开发利用的态度的差异性体现出不同的人地关系，不同的人地关系会影响到人类社会环境发生变化时的调整与适应能力。随着社会生产力的发展，人类利用和改造自然的能力（反作用力）还会不断增强。这是由于，当社会发展到一定阶段时，人类的知识和技术积累已经使其具备抵御轻微自然灾害、应对适当程度的环境变迁的能力。人类的文化传统一旦形成，便会沿着惯性向前发展。人类会在已经掌握的知识、技术的帮助下，改造环境因素使之有利于自身的需要。在新石器时代，自农业、制陶业出现，古人就通过劳作对环境施以影响。到历史时期，建立在农业基础上的农耕文化显示了人类对环境的有意识改造，人类不断地改进劳动工具、农作物品种，施肥灌溉，扩大新的耕地面积，提高农作物产量，全国各地的历史时期考古沉积层厚而稳定，说明此时人们的生活平和、人地关系和谐；而同时期的游牧民族在放牧的同时，也通过牲畜的饲养、人类的不定时耕作在不同程度上改变着地貌等环境因素。在秦汉以后的大一统王国中，各地区之间的文化交流更加便利，知识和技术在大范围内得到传播和增长，加之铁器等工具的广泛使用，人们改造自然的能力越来越强。

当人类从自然界摄取的能量达到生态系统的平衡时，人与自然两者才能长期共处。人类由狩猎采集经济进人到农耕经济后，人类的生态系统逐渐形成。人类对环境利用的同时也在破坏着环境，放火烧荒、乱砍滥伐、大面积制造草木灰使得生态平衡遭到破坏。特别是工业化竭泽而渔式的掠夺使生态系统严重失调，大量化肥造成土地板结、土质退化，化学污染物倾排到江河湖海，使鱼中毒，再转移到人身上；工业废气使地球变暖、海水水面升高；人口增长使生存空间剧减……人类对环境的破坏，从古到今，愈演愈烈，直接危害人类的生存。美国缅因州立大学海洋生物学家詹姆斯·阿什森等科学家在全球四大洲调查后，指出人类自1万年前就开始无节制地从海洋攫取食物，在加勒比海捕杀海龟，在澳大利亚海岸捕杀海牛，

① 曹兵武：《从仰韶到龙山：史前中国文化演变的社会生态学考察》，《环境考古研究》第2辑，科学出版社2000年版。

在阿拉斯加附近捕杀海獭，生态失调的种子在那时已种下，并影响到今天的人们①。

人类对环境的破坏造成的环境恶化，已引起全世界的关注，保护环境，爱护地球，谋求人类与环境的和谐，创造一个可持续发展的环境是全人类的责任。

第二节 动物考古研究

考古遗址中一般包含着相当数量的动物遗存，动物的骨骼占据了考古遗物中的很大比例。这些动物遗存通常都是古人生产、生活过程中有意放置、遗弃或者无意中留下的，在一定程度上反映了古人的活动和人们的生活环境。因此，对考古发掘所得的动物遗存进行种属判别、部位鉴定，并运用观察、测量、统计等多种手段，整理和分析考古遗址出土的动物骨骼，可以认识某一时段、某个地区存在的动物种类，了解古代人类居址附近的自然条件和生态环境，探讨古人与动物之间的关系及人类行为。如人类利用哪些动物作为肉食资源及肉食在人们食物结构中所占的比例如何？人们用哪些动物作为生产工具，哪些动物作为宠物？人类是如何利用动物的，等等。

对考古遗存中的动物遗骸进行研究，在欧美考古学界一直受到重视。考古学诞生的200多年来，欧美的动物学家和考古学家在世界上很多地方开展动物考古研究，取得了许多有意义的成果。动物考古研究作为复原古代人类生活环境、认识人与动物关系、进而探讨人类文化及其发展规律的有效手段，先在欧美，继之在日本等亚洲国家的考古学中发挥出积极的作用②，日益成为考古学研究的一个重要方面，许多学者还在研究方法、研究目的和研究理论方面作了深人探讨，出现了诸如动物考古学（Zooarchaeology）、考古动物学（Archaeozoology）等名称。1976年，在法国举行的第九届先史学与原史学国际会议上，正式成立了国际考古动物学会（International Council for Archaeozoology），简称ICAI。该学会隶属于联合国教科文组织，每四年举行一次全体会议。

---

① 阿闻：《古人破坏了海洋生态》，《中国环境报》2001年8月1日。

② 祁国琴：《动物考古学》，《人类学学报》第2卷3期，1983年8月；祁国琴、袁靖：《欧美动物考古学简史》，《华夏考古》1997年第3期。

中国的动物考古研究始于20世纪30年代,最早有代表性的工作是德日进、杨钟健等人对河南安阳殷墟考古发掘出土的动物骨骼所做的一系列研究①。但总的说来,20世纪80年代以前我国动物考古开展得很不普遍,且一般只停留在对动物种类和数量的鉴定和统计上,较少对动物遗存做深入分析和研究。近二十年来,伴随着改革开放,中国考古学与国际接轨,国外考古学理论和实践大量引介,极大地促进了中国的动物考古研究。重要的考古发掘都注意到了对动物遗存的收集、保存和研究,大大丰富了遗址的信息,并将研究的视角由环境扩展到人类行为与思想、文化模式、文明动力等领域,丰富了考古学研究手段,深化了考古学研究。

目前,动物考古的工作首先集中在对考古材料的定性定量分析,并在此基础上进行了一些更深的研究。

一、动物遗体的采集和记录

"发掘遗址时的遗物采集方法对动物遗体的分类和鉴定结果有很大影响"②。以往的考古学家通常致力于人工器物的形制及文化谱系编年的研究,对动物骨骼重视不够,甚至以为动物遗物是"自然遗物"(Nonartifactual)。所以在发掘中常常将出土的动物骨骼抛弃掉或不予以收集;即使采集骨骼,也多出于发掘者自己的认识,往往仅对有人工痕迹的骨骼感兴趣,而对其所采集骨骼的鉴定和研究,则基本上依赖于动物学家。于是,动物学家研究的则是被选择过的遗物,并不能真实地反映考古资料的全貌,并且他们的研究成果一般是作为附录出现在考古报告中,不被重视。实际上,任何考古遗址中出土的动物遗存都经过了文化的过滤,是人类活动(如选择性狩猎、特别的屠宰技术、家畜活动中动物本身的形态变异等)的直接结果③。所以,在考古发掘时,应对动物骨骼、陶器等人工制品一视同仁,并做好每一块骨头的发掘和记录。

---

① 德日进、杨钟健:《安阳殷墟之哺乳动物群》,《中国古生物志》丙种第十二号,第1册,1936年;秉志:《河南安阳之龟壳》,《安阳发掘报告》第3册,1931年;杨钟健:《安阳殷墟扭角羚之发现及其意义》,《中国考古学报》第3册,1948年;伍献文:《记殷墟出土之鱼骨》,《中国考古学报》第4册,1949年;杨钟健、刘东生:《安阳殷墟之哺乳动物群补遗》,《中国考古学报》第4册,1949年。

② [日]西本丰弘著、陈杰译:《动物考古学的方法》,《北方文物》2000年第1期。

③ Patricia D. Approaches to Faunal Analysis in Archaeology. American Antiquity, 1969,34(2):146-153.

采集动物遗存的方法与要求，与采集其他质料的考古遗物相同，而且需要更加仔细，因为动物骨骸易于破碎。应尽可能将出土的动物骨骼全部采集，以保证数量统计的准确和反映动物群的真实面貌。采集的标本应有其在发掘区内的坐标位置、层位或墓葬、灰坑编号等记录。还需要注意收集易于被忽略、疏漏的小型动物遗骸。[①] 也就是说，发掘时应对骨骼、遗存全部收集，但这需要充裕的时间、财力和人力。

鉴于过去发掘时一般采集较大的动物骨骼，常常忽视肉眼看不到的细小动物骨骼，现在多用筛选法（图12.1）或水洗筛选法。对于灰坑的土或贝丘遗址、洞穴遗



图12.1 筛选法作业图

赵丛苍摄于甘肃礼县西山遗址，2005年。

址的土壤全部采集，再用水洗法筛选。国内外学者用此法得到了许多用普通发掘方法无法得到的资料。日本的小宫孟用此法发掘贝丘遗址，得出绳纹人所食的鱼类中比例最大的是鰆鱼等小鱼，而非过去公认的黑鲷的结论。袁靖也用此法在兴

① 周本雄：《考古动物学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社1986年版，第252页。

隆洼遗址、尉迟寺遗址发掘中筛选出鱼骨①。在发掘工作中，还可根据发掘遗址的遗存情况、发掘经费和时间，使用柱状取样法。在发掘区确定采集地点，在该地从上到下每隔一定间距采取土样，水洗筛选，再进行分析按比例复原整体。日本北海道香深井A遗址就采用柱状取样法，进行了详细的发掘②。需要说明的是，在采样时柱状取样的量越多越好。

发掘时采集的动物骨骼要单独存放，不能和陶片等遗物放在一起，以免造成碰伤，这样做也有利于骨骼资料的整理工作。对于那些已碎或易碎的骨骼要采取加固措施，保证运输过程中不被损伤。对已经采集到的动物遗存要妥善保存。对动物遗存一定要有科学的记录，标明其出土单位、形状、数量，尤其是完整的动物骨架不仅要做全面的测量，而且要有照片、摄影等记录。对骨骼的特征性部位如左右、远近、中间等部位要做详细记录，否则，在日后的统计过程中可能会将一个动物骨骼统计为多个个体。记录时还需做细致的观察，看看有无人工加工、烧灼、砍割等痕迹，以及动物病理等现象，这种观察有赖于发掘者对动物知识的认识程度，当然，还可以请教动物学家。

二、动物骨骼的鉴定

动物骨骼的鉴定就是判断某遗存中有什么动物，是哺乳类（图12.2）、贝类、爬行类、鸟类，还是两栖类。一般地，贝类和哺乳类较易区分，其他几类就必须在骨骼部位确定后，才能确认其种类。动物骨骼的部位、种属鉴定比较容易，只要与标本对比即可得知，当然这需要一定的经验积累。用于对比的标本包括两类，一是现生动物的标本，用水煮法、浸泡法、土埋法等方法使现代动物的骨肉分离、油脂去掉，将骨骼制成标本；另一类是将已确认的古代动物骨骼作为标本。

鉴定时，先根据骨骼的大小、形状判断出是鱼类、鸟类还是兽类、贝类，再与标本相比照，确定其大致种属。然后，鉴定骨骼的部位，注意其保存状况，确认有无骨

① ［日］小宫孟、铃木公雄：《贝冢产鱼类の体长组成复原における标本采集法の影响について》，《第四纪研究》16(2)，1977年，第71—75页；中国社会科学院考古研究所内蒙古工作队：《内蒙古敖汉旗兴隆洼遗址发掘简报》，《考古》1985年第10期；《蒙城尉迟寺遗址出土大型排房式建筑》，《中国文物报》1993年1月3日第1版。

② ［日］新美伦子著、陈文译：《日本的动物遗存研究状况》，《华夏考古》1997年第1期。

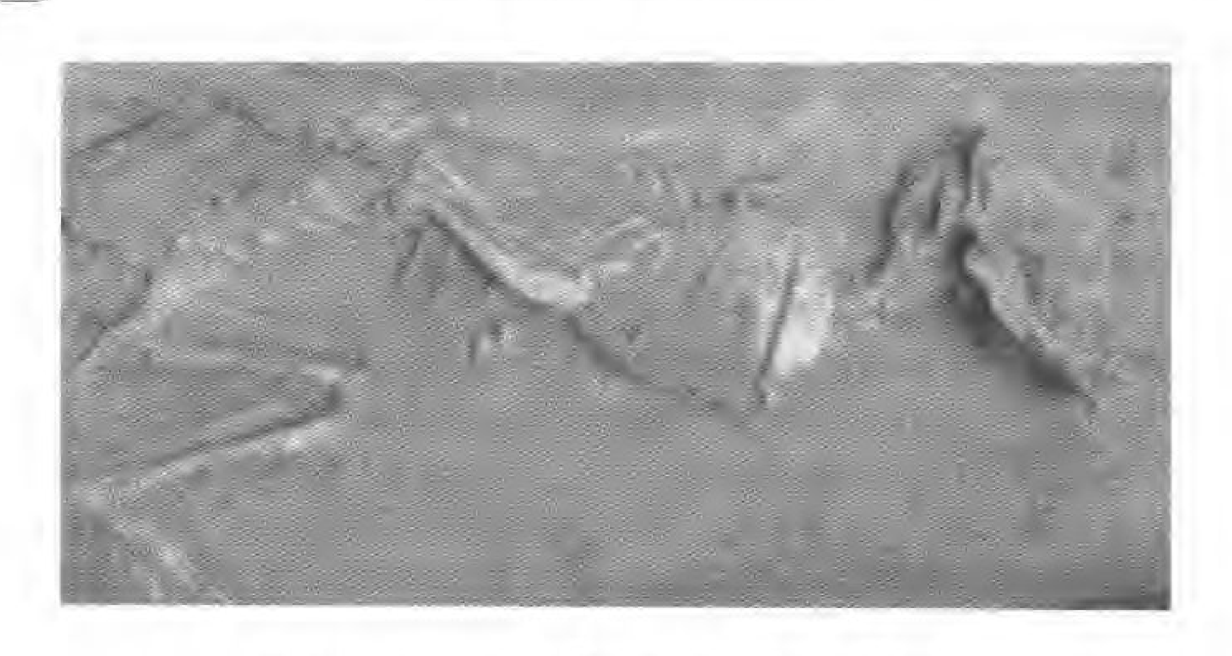


图 12.2 甘肃礼县西山遗址出土的哺乳动物骨骼(狗)

端,骨端有无关节。一般在判断骨骼部位的同时就可以鉴定出其种属。最后要对残骨进行观察、鉴定、记录,最好单独统计。我们知道,动物、植物体内都含有脂肪,脂肪由各种脂肪酸构成,其构成比例因动物、植物种类的不同而有差异,使用气体色层谱装量分析便知其比例,用此法可鉴定动物、植物类别,如日本宫城县古川市马场坊 A 遗址,就检测出猛玛象和鹿的脂肪酸①。也可以采用 DNA 分析法、免疫学的氧抗体法综合分析和检测动植物体内的遗存脂肪酸。对判断的动物遗存要进行记录,按生物学界规定的无脊椎动物、脊椎动物、纲、目、科、属、种的顺序记录。

确定了动物的种属后,就可以鉴定骨骼的年龄。对于无法确认的骨骼部位、残骨、种属,最好不要进行年龄鉴定。如果动物骨骼的上下颚骨间有牙齿,鉴定就比较容易。我们知道,不同种属动物的不同牙齿的生长时间是一定的,可利用各个牙齿的萌生时间、磨损状况、牙齿根和牙齿内部形成的年轮等特征,来确定动物的年龄。还可对骨骼的四肢骨进行鉴定,有关节者多为成年,反之则为幼年(因为成年动物关节一般都愈合),而幼年、少年(因个体大小而判定)的关节多没愈合。鹿类

① 戈君译:《脂肪酸——日本考古学最新的研究方法》,译自《情报·知识·midas》,日本集英社 1987 年版。

还可根据牙齿的石膏质最外层的形态(透明层为冬天,不透明层为夏天)、鹿角(它具有脱落、萌出周期)来鉴定该个体的年龄、死亡时间。贝壳类则可利用生长线的方法推断其年龄及死亡时间,贝壳生长时一天形成一条日轮,而且夏天的日轮与日轮间隔大,冬天的狭窄。因骨骼保存的情况不一,年龄的鉴定要多方面综合判断才会准确。当然,用仪器对动物的骨骼进行切片观察会更准确些,但这样做容易破坏标本,一般情况下不用这样的方法。

动物骨骼的鉴定还包括雌雄性别的鉴定。这可以根据骨骼的大小,牙齿的形状、大小等差异判定。如鹿的性别可通过对下颚骨的面积、骨骼的大小、耻骨大小等方法确认。此外,还得注意确定观察和了解动物骨骼的病变、损伤或加工情况。根据动物骨骼骨折、愈合情况可确定动物是否搏斗、被追捕过。事实上,要确定动物骨骼上的损伤是人工作用、意外损伤还是埋藏因素(动物啃咬、风化)是比较困难的,这就有赖于发掘者对古代先民加工骨器的规律的认识。如美国学者宾福德(Binford)依据民族学资料,总结出人类总是在动物的头后部、环椎间下刀,割下头,将脖子和脊椎部分分开,并割下四肢,而肋骨和脊椎骨的处理方式很多①。

对于用作鉴定的动物骨骼,要进行记录,一般多用简洁、明了的表格形式为好。对于鉴定的结果要全部记录,如我国学者袁靖设计的卡片方便明了(表12.1)②。

表 12.1 动物骨骼鉴定表

<table>
<tr><td>标本号</td><td></td><td rowspan="2">骨骼
分类</td><td>种属</td><td></td></tr>
<tr><td>骨骼
出处</td><td></td><td>部位</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">骨骼
状况</td><td>尺寸</td><td></td><td>病理</td><td></td></tr>
<tr><td>年龄</td><td></td><td>保存程度</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">人工
作用</td><td>切割</td><td></td><td>加工</td><td></td></tr>
<tr><td>砍砸</td><td></td><td>烧烤</td><td></td></tr>
<tr><td>埋藏
因素</td><td>动物
啃咬</td><td></td><td>风化</td><td></td></tr>
</table>

① Binford L R. Bones: Ancient Men and Modern Myths. New York, Academic Press, 1981,91.

② 袁靖:《关于动物考古学研究的几个问题》,《考古》1994 年第 10 期。

续表

草 图	
备注	

记录人： 年 月 日

采自袁靖：《关于动物考古学研究的几个问题》，《考古》1994 年第 10 期。

此外，在骨骼的鉴定中，要做好定量统计工作。比如，通过统计不同种类的动物及其数量，可以了解哪些动物对于人类是比较重要的，哪些是其次的，包括人类食肉的种类和数量情况。

三、动物遗存的研究

动物鉴定后，要进一步探讨动物与人类、自然界的关系，就需要借助数理统计方法进行定性、定量的分析。一般研究者多用动物的最小个体数和标本的总数量来确定该种动物在种群中所占的百分比，在中国，祁国琴在姜寨遗址的动物骨骼分析中首次运用该方法①。最小个体数的统计，可以了解某个遗址中各类动物所占的比例，进而推断人类对它们的利用程度，人们的食物结构的变化，以及动物家畜化的过程等方面。

（一）确定相对编年

根据现代动物或石化的动物学知识，以一些动物的绝灭时代早晚之差别来判断其所在地层的年代。动物遗存的研究在很大程度上证明了旧石器时代的存在和编年。旧石器时代遗址出土的动物遗骸全是野生动物，"通过对动物群的特征、组合与更替，以及对其中的绝灭种属与现代生存种属的比较和统计，可有助于确定遗址的相对年代，划分地层"②。

① 祁国琴：《姜寨新石器时代遗址动物群的分析》，《姜寨》，文物出版社 1988 年版。

② 周本雄：《考古动物学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社 1986 年版，第 252 页。

19 世纪五六十年代，法国人爱德华·拉代和英国人亨利·克里斯蒂在发掘了一批代表性的旧石器时代遗址后，认为人类与绝灭动物共存绝不只是一个时代，而是经过了好几个时代，并尝试着根据洞穴中的绝灭动物种类来建立与遗址相对应的编年，他们把法国西北部的旧石器时代分为（由晚到早）：原牛、野牛时代；驯鹿时代；猛玛象、披毛犀时代；洞熊时代。同时，把洞熊时代定为旧石器时代下部，猛玛象、披毛犀时代定为旧石器时代中部，驯鹿时代为旧石器时代上部①。尽管他们的分类方法存在着用非考古学材料进行考古学分类的缺陷（与石器共出的动物化石的不同并不代表着其时代的差别，而很可能是由于环境和生产活动方式差别所造成的），但绝灭动物化石对人类历史编年研究的重要意义由此可见。现代学者已将绝灭动物与燧石工具等共存物一起研究，用以确立旧石器时代的编年。

（二）复原自然环境

根据已经获得的动物学知识（现存以及石化的动物）和对古代地层里出土的动物种属鉴定和数量统计结果，以动物的生活环境和适合其生长的条件为基础，可通过各层位出土动物群组成的变化来了解当时环境的温暖化、寒冷化、湿润化和干燥化等情况。如姜寨遗址出土的 29 种动物中，除狗、猪是家畜，牛和梅花鹿可能是家畜或处于半野生状况外，大约有 25 种动物是野生的。黑熊、虎、猫、猕猴、麝以及鸟类中雕等在遗址中的出现，说明当时遗址附近（可能是骊山及其山麓）覆盖有一定面积的森林；田螺、珠蚌和大型淡水鱼类——鲤鱼、草鱼以及鸟类中鹈鹕和鹤的存在，说明该遗址附近必然会有较大的水域，而遗址中与水域之间生长着浓郁的灌木和草丛；特别是竹鼠的广泛出现，说明骊山脚下、临河两岸曾经分布着片片竹林，姜寨人生活在一个山清水秀、林草丰茂的自然环境中。尽管那 25 种野生动物中相当一部分种类目前依然生活在这个地区，但也有一些种类如獐、竹鼠、猕猴等，如今在关中平原已不复存在。另外，猪獾、豺等虽然生活环境广泛，但目前多分布在长江以南，在这些地区已非常少见了。这是由于几千年来人类的大量开垦和耕作破坏了森林和草地，不少动物丧失了栖身之地，被迫转移到别的地区。

① 祁国琴、袁靖：《欧美动物考古学简史》，《华夏考古》1997 年第 3 期。

另外,根据考古学、古气候学、第四纪地质学和海洋学的研究,第四纪以来,全球范围内气候确实发生过和正在发生着变化。有人对秦岭南北的史前动物群进行了研究,发现中更新世早期以前的秦岭南、北都发现南北方动物,说明此时秦岭海拔不高,没有形成地理障碍,还不能阻挡动物的迁移,秦岭南北还存在广阔的南北气候和动植物渐变、过渡地带。中更新世中期后,秦岭南北的动物群特征明显,结合孢粉分析,此时秦岭已升高,起到地理分界线作用,造成其南北两侧动植物间的明显分野①。

(三)家畜驯养的研究

家畜驯养与农业发明是文明化进程中具有里程碑意义的事件,标志着人类从过去的简单利用资源转为对资源实施一定程度的管理和控制,体现了人类知识和技术的积累和生存能力的增强。两河流域发现距今12 000年的家狗,距今9 000年左右的家养山羊和绵羊,距今8 000年左右的家养牛。东南亚地区发现距今8 000年的家鸡,欧洲发现距今9 000年的家猪,而中亚地区发现距今5 000年的家马。

判断考古遗址出土动物遗存是否为驯养动物,过去有多种方法。学术界曾提出,早期驯养的动物具有以下几项特征。

第一是个体大小。以狗为例,当人们开始将狼驯化为狗的时候,那些个体较小的狼通常更受人青睐。对牛的选择也是如此。大约是出于安全上的考虑,当这些动物尚未完全驯化时,体形较小者较之体形较大者危险性要小一些。与此相反,人们驯化马的时候,则是选择那些体形较大的,这是由其功用决定的:大个的马载重能力强于体形小者。因此,考古遗址发现的任何一种动物,只要其体形大小随着时间有规律地变化,无论从大到小还是从小到大,均有可能标志着该种动物驯化的开始。

第二是地理分布。驯养动物的地理分布,一般不会完全等同于野生状态下的情形。这是由于,当人群从原居地迁徙到一个新的地区时,他们会将原有的野生猎物随身带上。新栖息地的环境就有可能引起这些动物的进一步变异。

第三是种群数量。人们打猎时,被猎获的动物可能是雄性,也可能为雌性,既

① 祁国琴:《姜寨新石器时代遗址动物群的分析》,《姜寨》,文物出版社1988年版;武仙竹:《从动物群化石看我国南北气候分界线秦岭的形成》,《中国文物报》1996年5月19日第3版。

可能非常幼小，也可能很老，或者正当其壮年，种种可能都会存在。尽管人们在狩猎时可能会有一定的倾向性而非完全出于随意，但他们可能无法决定其最终所猎取的是什么样的对象。相反，人类对于驯养的动物却拥有完全的控制能力。大多数情况下，人们一般不宰杀雌性动物，目的是让其繁育更多的幼畜。但对雄性动物，除了保留少数以延续种群外，多数在年幼时即被宰杀、吃掉。因此，在考古发掘中，驯养动物的种群数量及年龄分布会呈现出一定的规律性，而野生动物则没有规律可循。如有些动物死亡年龄集中在 1～2 岁，说明它们是被驯养的，这是基于人们在狩猎时不可能只是有选择性地猎取年龄段非常集中这一认识。

第四是骨骼方面的变化。这是由于驯养会在较大程度上改变动物的生活习惯，从而造成形体上的变化。野生动物的骨骼一般比较密实和强壮，便于其适应野生状态下恶劣的生存环境。驯养动物则不用担心天敌的威胁，被圈养起来又没有奔跑的自由，因而无法长成其野生同类那样致密和强壮的骨骼。

这几种方法都带有一定的主观性和模糊性，缺乏客观性和统一标准。例如，使用第一种方法，要求同一种动物的骨骼标本数量达到具有统计学意义的多数时才有效，但这种理想的状况在考古发掘中是不常发生的。第二种，动物的形态具有相当的稳定性，在驯养的初级阶段其形体上的变化不会非常明显。只有经过长期的驯化，家养动物与野生种之间才有可能出现较大差别。针对第一种情况，学者们已经设计出新的判断标准。在驯养动物的开始阶段，动物的形体虽然不会发生明显的变化，但其食物结构却会发生较大改变，从自然状态转为受人控制。食物种类的变化会导致骨骼中的微量元素和同位素的不同，通过测定骨样本中的碳、氮同位素和各种微量元素含量，就可以区分某种动物是家养还是野生的。针对第二种情况，应当通过对大量骨骼、牙齿标本的测量，建立数据库，确立同一性强、易于为研究者共同遵循的判断标准。有条件者，可以先从考古学文化角度入手，再对骨骼进行年龄观测，最后对测量数据进行统计和对全部资料进行考古学的思考，则会是更加有效的方法①。

此外，根据考古学的某些文化现象也可以进行推测，如墓葬、祭祀坑、灰坑等遗址中的动物骨骼，应该是古代人类有意识的一种行为，其中的动物自然属于家养。

① 袁靖：《中国新石器时代家畜起源的几个问题》，《农业考古》2001 年第 3 期。

当然，最好应当根据研究对象的特殊情况，充分利用各种方法综合分析骨骼标本，从而得出可行的结论。

借助于分子生物学的方法，有可能提供家畜驯养的信息。驯化初期，交通极为不便，文化交流较少，家畜只能近交繁殖。这样，利用随机扩增多态 DNA（Random Amplified Polymorphism DNA）、微卫星等多位点分子标记，可望捋清古代家畜间的亲缘关系，进而探明它们的世系和谱系关系。Watanabe 等首先利用限制性片段长度多态性（Restriction Fragment Length Polymorphism）分析了家猪（包括亚洲猪和欧洲猪）、日本野猪的 mtDNA 限制性酶切图谱，结果发现亚洲猪和欧洲猪存在很大的遗传差异，表明两者有独立的起源。之后，其他学者的分子生物分析结果证实了 Watanabe 现代家猪的两个起源说。当然，由于分子生物学的工作主要集中在 mtDNA 方面，无法揭示父系对于后代基因的作用和影响。[1]

（四）动物资源的利用

人与动物的关系最重要的体现就在物质生活方面。动物首先是人类重要的食物来源，其次是人类制作衣物、生活用具、生产工具及武器的重要原材料，又是早期人类最重要的交通和代步工具。

人类以何种方式获取动物作为肉食资源的？袁靖通过对中国各地区新石器时代出土的动物骨骼进行定性、定量分析，得出依赖型→初级开发型→开发型的发展模式的被动发展论[2]。在这个模式后面蕴藏着一种规律，即当时的人类由完全依赖于自然环境提供的动物资源（以狩猎、捕捞的方式获取），到开始开发某些野生动物资源（以狩猎、捕捞为主，同时饲养一定的家畜），再到主要依靠开发的动物资源获取肉食（以饲养家畜为主、狩猎、捕捞占少数）的人类生活变化，是在肉食需求量的增加和自然环境提供的动物资源减少的情况下被动地形成的。袁靖等人根据河南渑池班村遗址动物资料的统计，发现距今 7 000 多年的裴李岗文化中家猪占 60%，鹿 54%，到距今 5 000 多年的仰韶文化庙底沟期家猪占 80%，鹿不到 10%，到距今 4 000 多年的庙底沟二期至距今 2 000 多年的战国时期，家猪比例在 80% 左右，而鹿的比例越来越小，通过家养动物猪和野生动物鹿百分比的递增、减少，说

① 胡耀武、王昌燧：《家猪起源的研究现状与思考》，《中国文物报》2004 年 3 月 12 日第 7 版。

② 袁靖：《论古代人类与动物的关系》，《科技考古论丛》（第 2 辑），中国科学技术大学出版社 2000 年版，第 31—32 页。

明该地区人们越来越依靠家猪获取肉食来源。

用最小个体数可以得出古代人类的肉食利用和获取肉食资源的方式,甚至可以推知当时的人口总量。遗址中动物化石的种数、数量以及肢骨破碎程度常可作为衡量主人食物丰度的标准①,用公式表示为

$$\Delta_{总量} = \Delta A + \Delta B + \cdots$$

$\Delta A = A$ 种动物数量 $n \times$ 该动物可供肉食量 m。当一个遗址的总肉食量得出后,再假设当时家庭的规模,如一对成年人和三个孩子的家庭,那么该遗址的规模即可知晓,家庭数 = Δ 肉食量/一个家庭的规模。在这个问题讨论上,首先得了解该遗址的屠宰规模、技术、肉的种类和分配,各种动物所能提供肉量的比例、动物的分布等因素,可以用电镜扫描、高倍显微镜等科学技术手段获取这些信息。

动物骨骼反映人类的经济信息很多。狩猎野牛等大型动物需要集团狩猎,反映了群居生活的密集程度;捕获鹿、羚、兔及其他小动物则凭个人力量就可,可能反映了以家庭为单位的经济状况。动物骨骼的破碎程度体现了人类的生产力水平,在长期的实践中,人类意识到动物的某个部位易于切割、砍砸、烧烤,并改进狩猎工具、加工工具。

动物骨骼较石制品、陶器等遗物更能准确地反映人类活动的季节性、地域性,因为人类总是选择性地狩猎。将不同种属哺乳动物的化石牙齿和大的状管骨切片、磨光后,可在高倍显微镜下观察其因气候、食物影响而形成的生长线,夏天的宽疏、透明,冬天的密、半透明或不透明。若不同种动物都死于冬季,说明该遗址在冬季被人类占用;若动物死亡时间各异说明人类在该遗址长年居住。还可根据候鸟、旅鸟等鸟类和其他季节性的动物确定遗址的利用情况。如在日本,大马哈鱼一般在秋天溯流而上,是人类捕获的季节,若某遗址中出现大量大马哈鱼,则说明该遗址秋天被人类居住使用过。此外,鱼类有周期性的生长特征和鱼被打捞后鱼鳞和绝大部分的鱼骨保持永久不变的状态,可以根据鱼脊椎骨的生长环、鱼牙质骨、鱼鳞等来断定鱼类的死亡时间。美国考古学家理查德·卡斯蒂尔对加利福尼亚州一个埋葬群遗址中的两个埋葬点发现的596块边缘完整的鱼脊椎骨进行测量,结果表明大部分鱼在6—10月份被食用后埋葬,少部分在11月—次年2月份,说明人

① 尤玉柱:《动物考古的若干方法》,《考古与文物》1986年第4期。

类在不同的季节使用了这两个埋葬点①。

人与动物的关系的最初形态是以动物作为衣、食、住、行的资源，随着文化的发展和文明程度的提高，人与动物之间又发展出多种多样的关系。当人类开始定居的农耕生活并驯养家畜后，对动物的处理更加多样化，或出于崇拜的目的对其进行掩埋，或将其作为牺牲供奉给死者。在考古中我们经常发现动物祭祀坑，或是动物的骨骼被有规律地埋放在墓中，结合其他资料可以推断当时人的信仰、意识等，如大汶口文化墓葬中盛行随葬猪下颌骨、肢骨和猪蹄；有些动物（野生或家养的）有时不是作为食物被使用，而是作为表达感情、思想的用具，用于特定的场合，如用大雁等鸟类作为盟誓的信物；有些动物则作为宠物饲养；龟甲和兽骨是中国古代重要的占卜材料。但不同地区、不同时代、不同文化的偏重不同，反映了不同人类群体的观念差别。

在分析所有动物（包括植物）的遗存时，要注意搞清人类的消费行为。人的粪便化石中发现的动植物残骸无疑是被作为食物消耗的。但是人类的衣食住行都取材于大自然，兽骨、角牙、脂肪、皮毛是人类不同的消费材料。此外，祭祀、喜好（如人类喜欢以狗、猫等为宠物）也可使动植物大量集中。我们相信，随着考古遗址中动物遗存的资料研究越深，积累越多，就可以进行更大范围内的纵向、横向比较研究，类似于区系类型的研究，在此基础上对不同地域的人与动物的关系进行探讨。

四、寄生物的研究②

20世纪80年代，欧美一些国家开始用遗址中的寄生物材料研究古代人类的行为模式及所处的自然环境，这是动物考古的延伸。我们知道，寄生物附着于或栖息于寄主体（宿主）的体内，并从中获取营养以维持生存；当宿主死后，寄生虫最终也会死在宿主体内或通过宿主的粪便排出。所以，通过对宿主的研究可以了解当时寄生虫的特征，进一步了解当时的自然环境和某些人类行为。

寄生虫的标本采集比较容易，但长期以来被人们忽略。只要采集寄生虫的生

① ［美］布莱恩·费根著、晓文译：《用鱼骨和鱼鳞判断遗址曾被占用的季节》，《北方文物》1990年第4期。

② 参见谢仲礼：《生物学与考古学的最新结合——考古寄生物学简介》，《考古》1993年第11期。

存环境即可，遗址中动物的尸体、粪化石、粪土、被粪便污染的垃圾，甚至活动地面都会有寄生虫的虫卵、幼虫、成虫。寄生虫的鉴定内容目前仅限于种属、特征、数量方面。尽管如此，对其鉴定需专门的技术。对于一般肠虫虫卵，用光学显微技术测定其大小尺寸、形态特征，而幼虫、成虫，则要用电子扫描显微技术，有些虫卵用显微技术不能鉴定到种，还需用免疫检测的方法来鉴定原生动物的包囊。

寄生虫的特化程度高，环境要求严，喜欢湿热的环境，受自然环境的约束很大，所以寄生虫可反映某个局部地区的环境变化。美国科罗拉多高原的现代印第安人中只发现1种寄生虫——蛲虫，但在该地区的史前遗址中却发现8种寄生虫，说明该地区史前时期比现代潮湿。但是我们要注意，农业生产引起的环境变化与地区气候的小规模变化都会改变寄生虫的生存条件，所以寄生虫的分析对复原自然环境的效果有限。同样地，受生存条件限制的寄生虫却可以反映人类的一些迁徙现象，在A地生活的人，会染上A地的寄生虫，当他们因贸易或季节变化或其他原因到B地时，又会感染上B地的寄生虫，这时他们的粪便会排泄出A、B两地的寄生虫，这在某种程度上反映了人类的流动。如在美国亚利桑那州佛拉哥斯塔夫附近的普韦布洛印第安人的史前遗址中发现了鞭虫卵，古生态学资料表明该地区史前时期气候干燥，而鞭虫卵只有在湿热背阴的环境下生长，这就是说，鞭虫是人类从其他湿热的地区迁来时携带的。

原则上，所有的湿润环境的土壤中都含有寄生虫，但实际上并非所有的遗址都适合进行土壤分析。美国罗得岛纽波特、纽约格林威治村的粪土分析结果显示，寄生虫卵的密度与植物食物的种子、花粉的密度成正比，密度越大与人类活动的关系越密切，所以，可进行选择性的土壤分析。通过局域性的研究扩大到更大地区的自然环境、人类行为的研究，而目前研究重点集中在寄生虫的种属、数量，它们在考古遗址中的保存状况及保存方式，寄生物的古代分布情况等方面。考古寄生物的研究还有赖于人们的认识和努力。

第三节　植物考古研究

植物考古的研究对象是考古发掘过程中发现的与人类活动直接或间接相关的古代植物遗存。所谓与人类直接相关的植物，是指那些满足生活和生产（食物、燃料、建筑材料、工具及用具等）需要而直接被利用的植物。这类植物中既有野生

的,也有经人类有意识种植的农作物。与人类间接相关的植物是指那些不直接为人类所利用但却影响到人类生活的植物,如天然植被和依附于人工生态环境的杂草树木等①。

过去的植物保存至今,大多以腐烂的、人类肉眼无法辨识的形式存在,这是时间、埋藏环境与植物本身特征作用下的结果。植物考古的研究是通过观察、分析考古遗存中保存的植物信息,结合现代植物学知识来推断遗存中古代植物的种属特性,并据以复原遗址周围的自然环境;通过对出土植物遗骸的种类、数量、组合关系等多种形式的统计分析,判断当时人类的生存环境和生存能力,进而探讨农业经济特点、生活发展水平乃至社会习俗。因此,植物考古研究的首要任务是如何获取考古遗存中的植物遗存,其次才是对所获遗存的分析和研究。

一、植物的形态研究

古代的植物历经多年,枝叶基本腐烂,保存下来的一般会以种子或果实的形式出现,而且多炭化或呈干燥的碎块或粉末状;也有一些是保持原有状态且比较湿润的。当然,有些环境下,植物的根茎叶也得以保存。此外,作为木材的木头也有残存。这些植物的遗存统称为植物大遗存(Plant Macroremains),通过肉眼或者放大镜、低倍显微镜就可以对其进行形态学的分析。针对这些不同的植物大遗存,可以进行不同的分析。

(一)木头残存的分析

在古代,木头的用途广泛,既可以用来盖房、做家具和生活用具,又可以做燃料,还可以用来做葬具。随着岁月的流逝,这些木头残留下来的大多已炭化。当然,在特别寒冷或干燥的地区,或者深埋地下且长期浸泡于水中时,木头会保存得非常完好。

对于这些木头的分析主要借助于树木解剖学的知识。双子叶植物次生木质部的属种鉴定主要依靠导管、管胞、木薄壁组织、木射线、木纤维等诸种特征;裸子植物次生木质部的属种鉴定主要利用管胞、木薄壁组织、木射线的一些特征和树脂道的有无等;单子叶植物主要根据管束的形态、分布等特征进行鉴定。江泽慧和彭镇

① 赵志军:《植物考古学的田野工作方法——浮选法》,《考古》2004年第3期。

华所著的《世界主要树种木材科学特性》可作为参考①。

大块的木头当然可以比较容易地观察其形态，进行属甚至种的鉴定。炭化的碎片要分类、烘干，然后在显微镜下进行观察。

Hilary Deacon 和同事们对南非好望角的 Boomplass 洞穴遗址中的炭化木进行了分析，其中属于冰期时代的炭化木和属于 14 000—12 000 年前的炭化木明显不同。该遗址的炭化木直接反映了气候和植被方面的逐渐变化，而这些变化又导致了大型食草动物的灭绝②。

（二）种子、果实的分析

种子、果实虽然比较小，但在考古发现中却常常能遇到。由于植物种子及果实对于确定古代采集业、农业活动存在起着越来越重要的作用，因此搜集、妥善保管古代植物的种子、果实就成为植物考古的一项重要工作。但是，这些炭化的植物遗骸却容易破碎且细小，因此对其提取就需用特殊的方法。

1. 浮选法

浮选法又称“水选法”（Water Separation Technique），是植物考古学家们根据炭化物质的特性而设计的，专门用于发现和获取埋藏在考古遗址中的炭化植物遗存。它是将从地层、灰坑、窖穴等考古层位发掘出来的堆积物，放入水或氯化锌等溶剂中，使堆积物中包含的果实、种子、根茎等植物遗存浮于液面，经过富集筛选出植物资料以供研究。③ 换句话说，浮选法的工作原理是基于植物遗存（最常见的是炭化的植物遗骸）比重略轻于水而土壤与周围遗存比重不同、在溶液中悬浮状态不同的特性。

最早在 20 世纪 60 年代，国外已开始有人利用水的浮力来区分灰土中细小的有机物质，如英国人 S. 司徒威（Struever）在发掘苹果湾遗址时采用浮选法，竟从 95% 的器物（共 200 件器物）的存留物中发现了植物遗存。④

---

① 汤卓炜：《环境考古学》，科学出版社 2004 年版，第 143—144 页。

② 转引自科林 · 伦福儒、保罗 · 巴恩著，中国社会科学院考古研究所译：《考古学：理论、方法与实践》，文物出版社 2004 年版，第 247—248 页。

③ 周本雄：《考古植物学》，《中国大百科全书 · 考古学》，中国大百科全书出版社 1986 年版，第 255 页。

④ Struever S. Flotation Techniques for the Recovery of Small-Scale Archaeological Remains. Am. Antiq, 1968, 33: 353 – 362.

浮选法的操作比较简单。第一步是采集样品，一般在考古发掘的同时进行。如果推断某处（遗址的地层单位）可能有植物遗存而且有必要采集时，就可以采样。采样要注意样本的代表性和普遍性，一定要采那些真正代表某一环境的样品。浮选采集的方法常见的有剖面采样法、针对性采样法和网格式采样法（图 12.3）①。还要注意不能污染样本，要注意防止现代杂物的混人。采样时，以

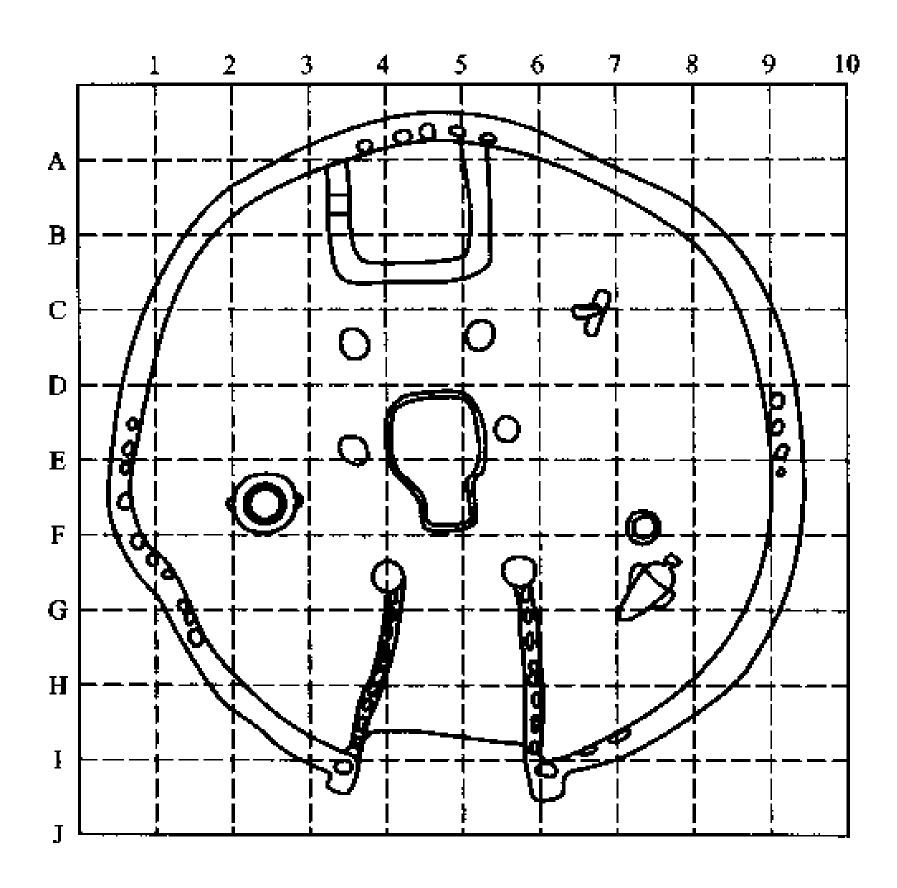


图 12.3 网格式采样法

采自赵志军：《植物考古学的田野工作方法——浮选法》，《考古》2004 年第 3 期。

干净的工具将所取样品（包含植物遗存和附着的周围土壤及其他共存的堆积物品）迅速装人塑料袋或橡皮袋中并立即封口，贴上标鉴，注明出处。如果样品量丰富，可多采集，从数千克到数十千克均可。

① 赵志军：《植物考古学的田野工作方法——浮选法》，《考古》2004 年第 3 期。

第二步是样品的处理。由于采集的样品通常是潮湿的，而炭化物质又具有较强的吸水性，所以最好进行干燥处理。一般是将样品摊开（如出现板结的要将之散开）放在通风阴凉的地方阴干。

第三步是浮选样品。将采集的样品投放到配备好的水或氯化锌溶液中，根据样品的多少选择沉积时间和溶液量，可轻微缓慢地搅拌溶液使其充分溶解。然后，将浮于溶液上层或表面的东西打捞筛选，便可得到植物标本资料。浮选样品需要特定的设备，Gordon Hillman 设计了一个循环水的浮选设备（图 12.4）①，操作较方便，我国学者赵志军也制作过三种浮选仪器②。

第四步是将浮选所得的植物样本送至显微镜下进行鉴定、分析。

2．水筛法

水筛法，又称漂洗法。其原理是土壤颗粒和植物遗骸在体积上是有区别的，所以借助于水的力量可以将土壤滤出筛孔，而将植物遗骸保留其上，进行提取。

水筛法的过程是先将土样放入筛子，在水中摆动筛子或用强水压自上而下冲刷。将土滤净之后，从筛子上提取植物遗骸。这种方法的装置比较简单，只要一个可盛水的大容器，可以称量土样的工具，可打捞的小型过滤筛及作为包装材料的干净白布即可。

水筛法在我国的考古工作中使用较多，但这种方法存在搅碎植物遗骸和漏掉细小植物遗骸的缺点，所以其提选率较浮选法低，在条件许可的情况下尽量使用浮选法③。

在实践中考古工作者对提取样品的装置和方法进行了改进，如图12.5所示。制作一底部有孔的容桶，使用时先堵塞住底孔，将土样放入桶中，注入一定量的水，充分搅动，使植物种子、含碳类的遗物等漂浮在上面，用小型过滤筛进行打捞，然后抽开容桶底孔堵塞，同时开启水管注水，下流的泥水经网眼由粗到细的三层筛子过滤，使不同比重的遗物存放在筛子上。

二、植物的微观分析

在考古遗存中，植物由于燃烧或其他原因变成朽灰，就很难从外形上判断它的

---

① 转引自科林·伦福儒、保罗·巴恩著，中国社会科学院考古研究所译：《考古学：理论、方法与实践》，文物出版社 2004 年版，第 246 页。

② 赵志军：《植物考古学的田野工作方法——浮选法》，《考古》2004 年第 3 期。

③ 赵志军：《植物考古学的田野工作方法——浮选法》，《考古》2004 年第 3 期。

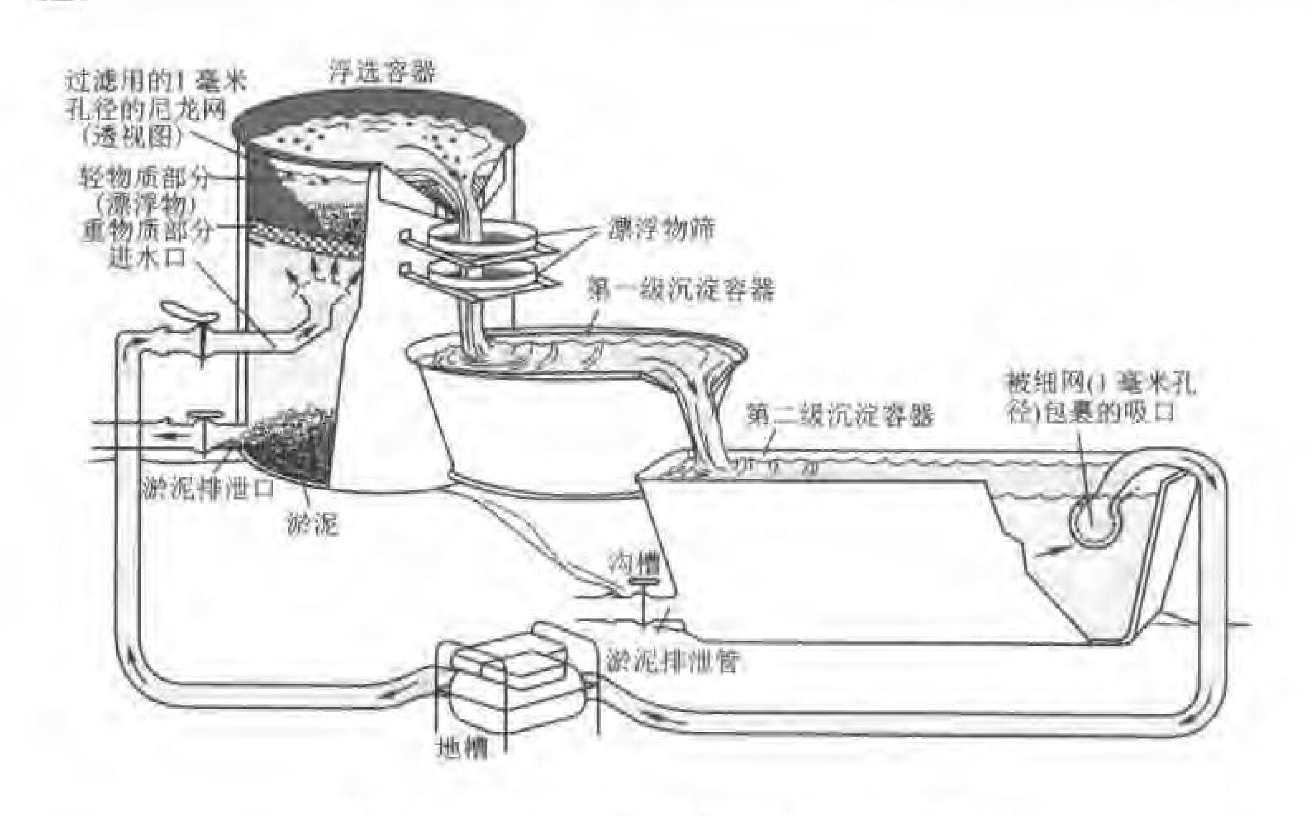


图 12.4 Gordon Hillman 设计的循环水浮选设备

采自科林·伦福儒、保罗·巴恩著,中国社会科学院考古研究所译:《考古学:理论、方法与实践》,文物出版社 2004 年版,第 246 页

种属了。但学者们发现,沉积于某些植物体中的"微体化石"却可供研究。也就是说,从微观角度看,植物遗骸有植物硅酸体、孢粉、硅藻等。相应地,有植硅石分析法、孢粉分析、硅藻分析以及植物的 DNA 分析等。下面介绍经常使用的几种方法及其所获取的信息。

(一) 孢粉分析

孢粉分析是孢子花粉分析(Spore-Pollen Analysis)的简称。孢粉分析法诞生于 20 世纪初,30 年代被考古学家所使用,遂渐形成一门学科——孢粉学(Polynology)。孢粉学与地质、地理、植物、古气候、古人类与考古等学科关系十分密切,在这些领域中应用广泛。我国的很多考古遗址如北京周口店、江苏草鞋山、浙江河姆渡、西安半坡、舞阳贾湖等都进行了孢粉分析。

孢粉分析主要研究化石和现代维管束植物产生的孢子和花粉(如苔藓、蕨类



图 12.5　水筛法作业图

赵丛苍摄于甘肃礼县西山遗址，2005 年。

植物的花粉）[①]。"孢粉"是孢子和花粉的简称。孢子，是指苔藓、蕨类等植物的繁殖细胞；花粉，是指裸子植物和被子植物的繁殖细胞。花粉具有一些特征：第一，单体体积小（一般为 10～100 微米），重量轻（不到 10^{-9} 克），产量大（一株植物所产花粉以亿万计），易于被风吹扬成"花粉雨"散落地表。在空中距地表 200～500 米的空间花粉浓度最大，横向传播，有些花粉可传播到几公里以外，但所有植物的花粉绝大部分落在母体植株的附近地区。这样岩层中包含的花粉组合反映了原始植物的基本面貌。第二，不同种类的花粉其大小、形状和外壁结构不同，这样有可能从化石花粉推断其母体植株。第三，花粉粒具有坚固的外壳，并具良好的耐压、耐碱、抗高温性能，所以在地层中能较好地保存下来。[②] 实际上，孢粉分析的对象是它的

① 姜钦华：《花粉分析与植硅石分析的结合在考古学中的应用》，《考古》1994 年第 4 期。

② 周昆叔等：《花粉分析法及其在考古学中的应用》，《考古》1975 年第 1 期。

外壁。根据孢粉的特征可能求得花粉谱（图 12.6），建立区域标准花粉序列，花粉谱的变化反映整个植被状况的变化，花粉谱中不同数值的变化说明植被成分的变化，而植被成分的重要变化通常由气候变化或人类活动引起。从孢粉或孢粉组合的花粉谱可以推断遗址附近的植被基本面貌及人类使用植物的基本情况。

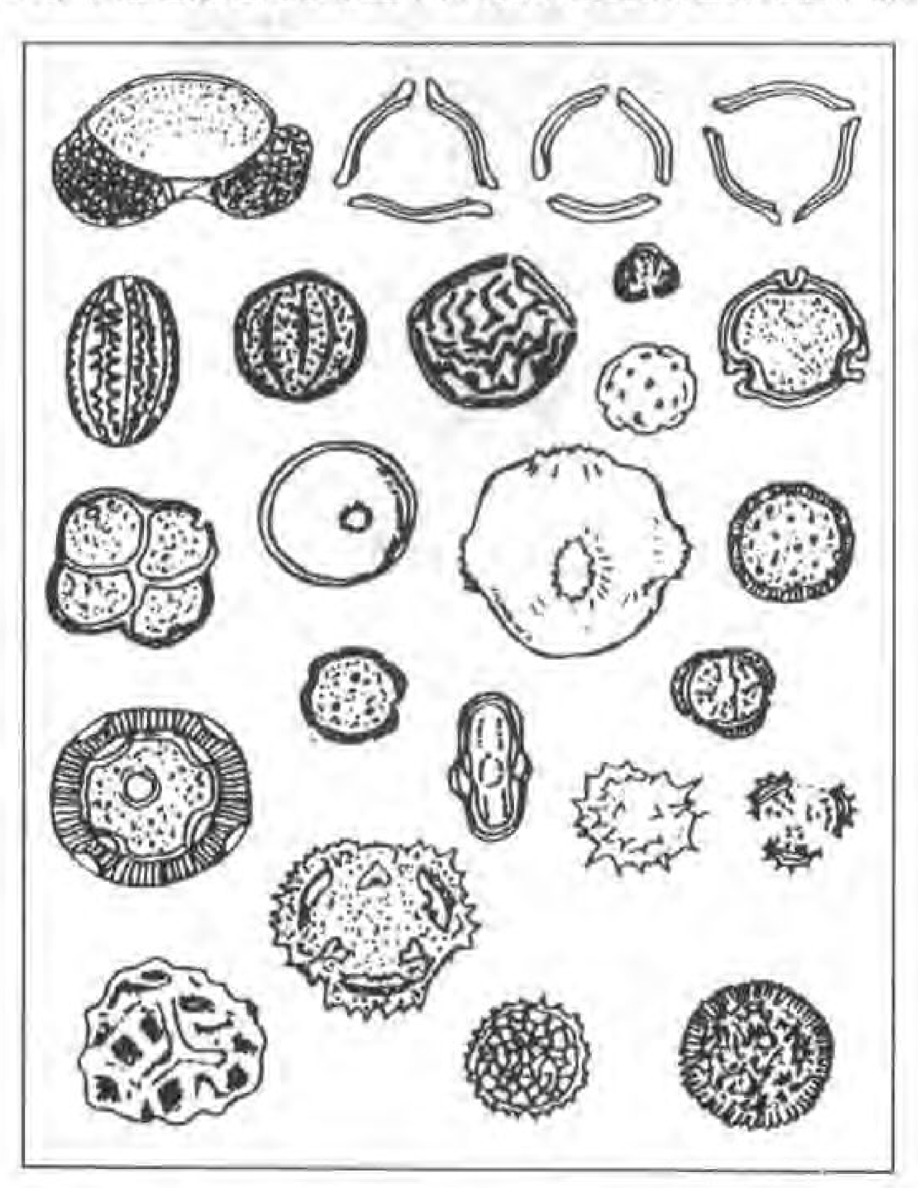


图 12.6　常见孢粉图谱形态特征图

采自汤卓炜：《环境考古学》，科学出版社 2004 年版

花粉的采集非常关键。样品主要从文化层中采取，也可从陶器及其他容器的内含物、附着物上取得。最好是在含遗物多、层次清楚、堆积层厚的剖面取样。取样方式可根据研究目的和遗址的类型采取柱式采样（在垂直的纵剖面视具体情况定间距挖取）、水平采样（在同一时期空间上不连续的区域取样）和槽式采样（柱式采样的一个变种，用类似三角形有凹槽的器具取样）。采样时一定要遵守纯洁性原则，防止样品的混杂和沾污，防止现代花粉混入，每采集完后要清洁泥铲等取样工具。采样的重量见表12.2。

表12.2 孢粉采样的标准

名称	黏土 亚黏土 亚砂土	砂 沙砾	泥炭
采样量（克）	500	500～1 000	5～10

到达采样处，先刮去一薄层，随即采样。最好一整块采样，用纸包封再放入塑料袋中封口，随附标签，编号，注明采样地点、取样深度。有时为了研究的需要，还可在表土采集一些样品，以便进行更好的比较分析。

接下来，对土样进行各种化学处理，诸如分离样品、烘干、氧化处理、分选、浮选、制片等。

最后是将孢粉样品拿至显微镜下观察，确定孢粉中的植物种属，并与当地现存植物种属作比较，推测当时该地的植被状况和气候特点。一般采取孢粉组合的综合特征来进行分析。

孢粉分析在考古学中的应用集中在三方面。

第一，确定地层和考古遗址的相对年代，这基于花粉分析资料所反映的古气候、古地理的变化来划分时代，对照附近区域已建立的自然沉积花粉序列和^{14}C年龄即可确定该遗存年代。

第二，了解过去人类生活的自然环境及其变迁，以及人类社会发展与周围环境的关系。由于不同植物孢粉的外表形态不同，故在显微镜下，可根据孢粉的形态判定出不同时期植物的种类，进而根据植物群落的组合特征，依据现代植物分布与地理环境和气候的关系，推断出各个时期的植被类型及其反映的

气候和地理条件，进而综合地质学和动物学有关环境的研究成果，复原史前人类生存的自然环境。例如齐乌云等通过对胶东半岛贝丘遗址的花粉分析，复原了距今5 700—4 900年的气候演变和古植被状况，结合当地古代文化遗存等，得出：气候变化对胶东半岛人类生存活动的空间范围、生产方式以及对贝丘遗址的消失有一定影响，但基本上并没有改变人类的活动范围和生产方式；该遗址的消失是自然、人文的双重作用，内陆地区的农耕文化是其消失的主要原因。①

第三，了解古代社会的文化活动及文化发展状况，特别是农作物的起源及其传播方面。如麦乐内什研究美洲农业起源时，通过花粉分析先寻找到与玉米有关的野生作物分布区，后又发现了公元前5000年左右的玉米。经过分析得知，大约到了公元前3000年，玉米棒和玉米粒度变大，玉米成为主要的食物来源，出现了人口增长和定居加强的聚落变化，可见农作物对社会和文化产生了很大影响。

到目前为止，世界各地都建立了孢粉序列，对恢复古代气候、自然环境起了重要作用。

孢粉分析的局限性有以下几点：

(1) 各种孢粉的传播能力、数量不同，并因天气的变化而变化，因而花粉与植被成分不完全是平行关系。

(2) 由于种种原因，某些地区的花粉积聚较少，人为地砍伐树木和刀耕火种的农业活动，以及取样地点的使用过程中花粉降落时间较短等原因都影响了花粉的含量。

(3) 花粉沉积时在氧化过程中被破坏，也能被土壤微生物消化掉。

(4) 有时候花粉分析并非花粉的天然降落，而是人们为了建造房屋、加固被淹没的地面和为了食用或饲养牲畜把成百立方米的植物带回村庄的。谷物花粉比例高（如占全花粉的15%）也并不意味着有过大量的谷物种植（麦田遗址的小麦花粉不过3%），而是因为人们在给谷物去壳和用小麦、高粱秆编织器皿时把花粉无意

① 齐乌云等：《从胶东半岛贝丘遗址的孢粉分析看当时的人地关系》，《考古》2002年第7期。

识地集中起来①。所以,对花粉集中的地方分析时要慎重,看看属于哪种人类行为。

花粉分析的不足可以由植硅石研究弥补。一般来说,植物考古分析采取孢粉分析与^{14}C断代、植硅石相结合的方法。1990年北京大学地质系等单位用花粉分析和植硅石分析相结合的方法对北京平谷上宅遗址与北京房山镇江营遗址进行了测定和研究,上宅距今约6 000—5 000年,共分八个文化层;镇江营遗址距今约8 000—7 000年,分七个文化层②。另一种是采取排除的方法,即找出遗址附近同年代的原生自然堆积,把原生自然堆积中的孢粉与文化层的孢粉对比分析;还有一种方法是在遗址不同位置取同时期多块孢粉样品,进行对比研究③。

(二)植硅石分析

植物硅石(Phytolith)又被称为蛋白石植石(Opal Phytolith)、植物蛋白石(Plant Opal)、硅石植石(Silica Phytolith)、植物硅酸体(Plant Silica Body)。植硅石分析法在1929年被德国学者 Edman 和 Soderberg 用于鉴定陶片碎屑中的水稻遗存,近二三十年左右得到迅速发展,在欧美国家以及东亚的日本等国备受重视,美国创立了"植硅石研究协会"并出版期刊、专著(《植物硅石分析:在考古学和地质学中的应用展望》,Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective)。植硅石分析法广泛应用于植物学、动物学、农业学、土壤肥料学、地质学、考古学、生物药学等领域。

植物包括粮食作物在其一生中具有从土壤中吸收大量硅酸的特点,而且是以硅酸钙的形态在叶片、叶鞘、花序等器官中某些特定细胞的细胞壁上沉积起来,形成一层坚硬的外壳;大多数植物都能产生具有独特形态特征的植硅石个体或组合群体。一般地,单叶子植物比双叶子植物的硅酸体含量高,禾本科植物比一般植物高(图12.7)。

---

① 皮特尔·白特甘著、赵冰译:《新石器时代湖边居址和自然资源的管理——一种多学科交叉的环境研究方法》,《考古学研究》(四),科学出版社2000年版。

② 齐心:《北京地区考古工作应用科技手段情况介绍》,《考古文物与现代科技》,人民出版社2001年版,第19页。

③ 袁秀芬:《考古资料中的环境信息》,《环境考古研究》(第2辑),科学出版社2000年版,第31页。

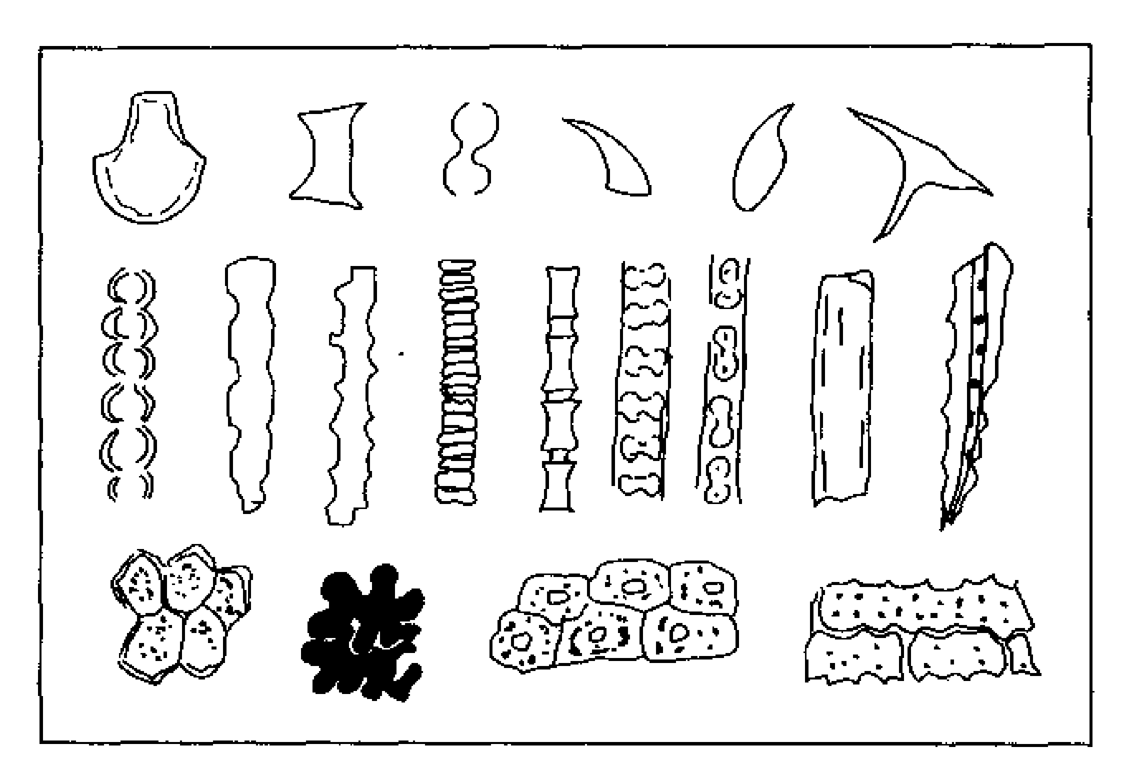


图 12.7　植硅石常见形态示意图

采自王永吉、吕厚远:《植物硅酸体研究及应用》,海洋出版社 1993 年版。

硅酸体的主要化学成分是非晶质含水二氧化硅($SiO_2 \cdot nH_2O$),其理化性质稳定,不仅存在于植物生前,而且当植物体因各种原因被破坏后,其中的硅酸体也不会被分解,万年甚至百万年地保持其固有形态,在各类土壤和地层中富集和保存。植物硅石在禾本科植物的果实、皮壳、叶子中保存量最大,特征量明显。植物硅石还具有个体小(2 ~ 2 000 微米)、产量高(水稻每克干物重含数万个细胞硅酸本)、抗烧(溶点在 950℃)、抗风化、抗酸碱、比重大(1.5 ~ 2.3)、分散程度低(因而更能代表当地植被)等特点。

不同的植物其植物硅酸体形态组合、形态特征不同,不同的植物具有不同的硅酸体,同一种植物也有多种不同形态的硅酸体(表 12.3)。在光学或扫描型显微镜下,各种植物的主体细胞形状清晰。

表 12.3　不同类型植物的硅酸体特征

植物类别		植物硅酸体主要特征
蕨类植物		折曲或极端锐角的三棱柱状、带有穴状纹饰的棒状和三棱柱状等
裸子植物		不规则立方体或多面体形、扁棒状或薄板状、表面有突起、皱纹的椭圆形或卵形、膝状或长靴状、石块或石屑状、松树皮状等
被子植物	禾本科	扇型、哑铃型、方型、长方型、尖型、鞍型
	其　他	边缘弯曲的板状或不规则齿状、多边板状、“Y”字形或弓形，具有网纹脊的块状及纺锤状、具有螺旋纹的纺锤状及导管状、鸟嘴状、球状、刺状、多边帽形、硅质突起等

植硅石分析法就是利用植物硅酸体的这种高残留性及其形态上的种间特异性，通过对土壤中所含植物硅酸体的大小、形状、种类及密度等，推断其起源中古物的类型和产量、所属时代、区域等的一种古生物分析法。①

植硅石分析不受样品质地的影响，采样面比较广泛。考古遗址在堆积、过程中因人类使用植物而有可能积聚大量的植物茎叶，遗址的土壤大部分植硅石来源于原地腐烂的植物，反映了过去人类活动对植物的选择和人类使用植物的情况；遗址的许多部位，尤其是灶、储藏区、生活区、容器内也会残留植硅石，对这些植硅石进行分析可以了解遗址各部位的功用。此外，动物和人类的牙齿、某些石器、灰烬（堆）也是植硅石很好的材料来源。

植硅石与花粉沉积、埋藏等方面的过程相同，所以采样方法也与孢粉采样相似，故此不赘述。室内研究方法也大同小异，先用酸碱办法处理，再用重力沉积法、重液浮选法提取植硅石，接着用甘油胶制片，最后送至扫描电镜或其他光学显微镜下观察。王才林等人对江苏昆山市少卿山遗址的植硅石分析流程如下②：

① 王才林等：《植物蛋白石分析法及其在考古学上的应用》，《东南文化》1997年第3期。

② 王才林等：《江苏昆山市少卿山遗址的植物蛋白石分析》，《考古》2000年第4期。

(1) 材料的提取。取一定体积的土壤样本烘干称重,并计算土壤容重。将土壤敲碎成粉末状后秤取1克土样放入15毫升的玻璃瓶。然后加一定量的精制玻璃砂,作为定量分析的参照物。加水并注入数滴分散剂后,用250瓦、38千赫的超声波处理20分钟,以清除植物蛋白石表面所吸附的土壤颗粒。接着用水中沉底法剔除粒径小于10微米的微小粒和其他杂质。最后烘干、制片后在光学显微镜下镜检观察。

(2) 统计定性、定量分析。根据一定的公式计算出各种植物蛋白石的含量,再换算成单位体积土壤中的植物生产量。根据定量分析的结果,然后对水稻机动细胞蛋白石的样本进一步用形态测定仪作形态分析,将其结果带入特定的判别式,来判断当时水稻所属的籼、粳类型。

植硅石分析的最重要的一步是制作现代某类(因分析目的而选择不同类别的植物)植物的植硅石参考标本。一般地,就近取材,在考古研究地区采集现代植物标本制成植硅石标本,其制作步骤简要为:

(1) 用悬浮法、氧化法从土壤中分离植物体;

(2) 称植物干重2~3克或叶片半片左右,用温蒸馏水清洗、烘干、切碎,放入蒸发器中;

(3) 以浓硝酸10~200毫升加热一天左右,再加少量高氯酸氧化去除有机物质;

(4) 清洗,超声波离检处理,做片、装片;

(5) 镜检。

取得一定的植硅石形态特征后,可以进行定性、定量分析。定性分析是分析各种植物硅酸体的形态特征,确定其起源植物类型。定量分析是参照所测地区现生植物的排列密度、产量来了解植硅石的植物硅酸体密度,换算出其种子重(不同的植物种类其硅酸体的密度不同),再由土壤容量算出其产量,确定该植物的分布范围。吕厚远等人通过对现代10种水稻扇型硅酸体的研究,得出了鉴定水稻扇型硅酸体的判别函数,并用判别函数对考古样品(五铢钱范、王因红烧土、河南省渑池县班村遗址剖面、江苏吴文化陶范、河南殷墟红烧土)中的扇型硅酸体进行了

判别①。

植硅石分析法为许多考古问题提供了独立的数据和解释：

(1) 恢复遗址的自然环境与古人对遗址占用有关的环境改造。植硅石分析可弥补花粉资料的某些局限，提高古植物的准确度，了解人类使用植物的信息和生存情况。王永吉等人对山东兖州王因大汶口文化遗址的红烧土进行了硅酸体分析，发现哑铃型、扇型、方型硅酸体占优势，说明当时当地气候温暖湿润，这与遗址中出土的扬子鳄遗骸和热带蕨类孢子反映的情况一致②。

(2) 国内外许多学者用该方法了解农作物的起源、扩散、当时的农业技术、方式、系统，为原始农业的起源和发展提供了有力的证据，进而为探讨原始文化的交流提供了资料。

(3) 野生植物的可利用性、经济价值和非经济价值。

(4) 技术、经济和社会、组织之间的关系。③

在秦俑坑的棚木上层及柱子周围发现大面积的青灰泥，其土质坚硬、细腻，可用于防潮、防渗水、延缓棺椁腐朽。但对于其成分，多不清楚，吕厚远、吴乃琴对青灰泥硅酸体、生物化石、碳屑含量、碳酸钙含量和磁化率进行测试。青灰泥和上覆的花土的植物硅酸体组合见图 12.8，3 个青灰泥中植物硅酸体组合并不一致。1 号青灰泥样品中棒型、尖型、帽型含量相对较高，反映了适应寒冷气候的草本植物相对增多；3 号样品中芦苇扇型含量远远高于正常沉积土壤中芦苇型的含量；2 号青灰泥样品和 3 个上覆花土样品的植物硅酸体相似，与正常发育的全新世土壤硅酸体组合接近，反映了相对温暖的森林草原植被类型。兵马俑碎片、秦下水道残片与青灰泥、上覆花土的植物硅酸体组合有一定差别。测试结果表明，秦俑坑中青灰泥的成分很不均匀，可能是当地的自然土壤加人石灰和草木灰，加水混合而成细腻的泥巴，涂抹在俑坑木质周围。④

---

① 吕厚远等：《水稻扇型硅酸体的鉴定及在考古学中的应用》，《考古》1996 年第 4 期。

② 王永吉等：《植物硅酸体研究及应用》，海洋出版社 1993 年版。

③ 多洛雷斯·派潘诺著、姜钦华等译：《植硅石分析——在考古学和地质学中的应用》，北京大学出版社 1994 年版，第 114 页。

④ 魏京武等：《秦俑坑出土的青灰泥的成分及其来源的测试研究》，《科技考古论丛》（第 2 辑），中国科学技术大学出版社 2000 年版。

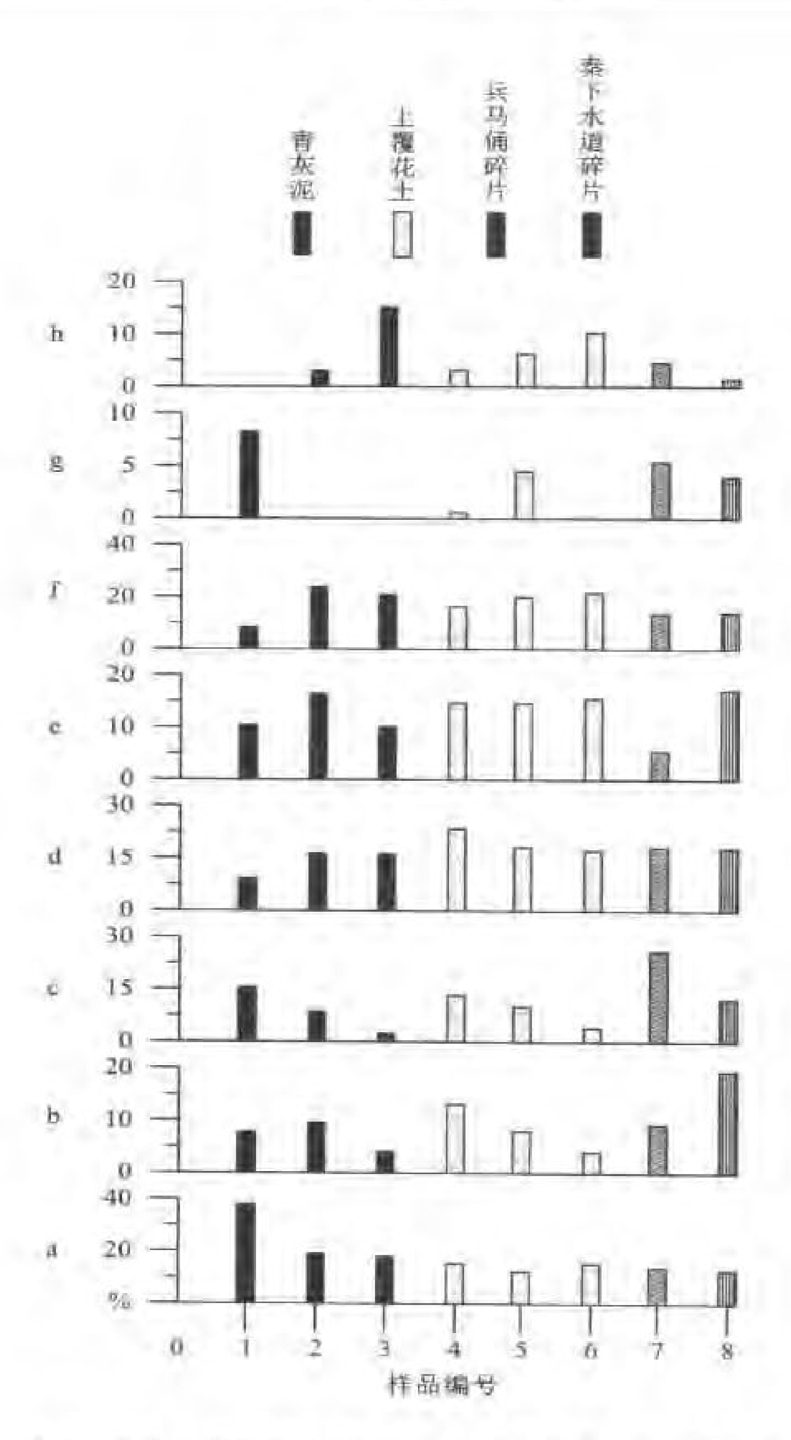


图 12.8 兵马俑考古遗址不同样品的主要植物植硅石类型组合

a. 棒型；b. 长尖型；c. 短尖型；d. 方型；e. 长方型；f. 扇型；g. 帽型；h. 芦苇扇型

采自魏京武等：《秦俑坑出土的青灰泥的成分及其来源的测试研究》，《科技考古论丛》（第2辑），中国科学技术大学出版社2000年版。

植硅石分析法处于初级应用阶段，尚有不完善性和局限性，如植硅石分析法对豆类、薯类植物就束手无策。

（三）孢粉与植硅石分析的结合

近十年来，古植物学家在实践中感叹孢粉分析与植硅石分析的各自不足，并尝试将二者结合起来，结果发现效果甚佳。①

这两种方法可以互相补充，全面展示环境信息：

（1）古遗址环境的研究。考古遗址的花粉通常积聚太少或没有，用花粉进行分析就提供不了多少信息。而考古遗址在堆积过程中积聚了很多的植物茎叶，植硅石分析可以分析遗址的环境变化和人类对植物的选择、利用情况。

（2）古代植被的恢复。木本植物的花粉易于识别，花粉分析可区别出森林、草原。禾本科植物硅石的形态规则，木本类植物硅石形态不太规则，植硅石分析能确定草原的性质，是高草草原还是矮草草原。两种方法单一运用结果都不太准确，同时运用可以鉴定乔木林的种属以及草原的不同草本植物成分。②

（3）栽培植物研究。栽培植物中，禾本科、菊科、葫芦科、桑科、胡椒科、荨麻科和蔷薇科的植物花粉不易鉴定到属种一级，但它们能够产生丰富的具有极大分类意义的植硅石，这对于研究它们的起源意义重大。而番大瓜科、茄科、木棉科、豆科等类栽培植物不产生或产生的植硅石不具有分类作用，这只能依赖花粉分析。森林砍伐、农耕作业使得花粉减少，同时却积聚了许多植硅石。研究表明某些地区的一些层位有玉米花粉，却没有玉米植硅石。③

通过系统的花粉序列和植硅石年代序列可以恢复区域的地理植被、经济作物、生态环境、农业起源，甚至可以了解过去人类生活的情况。姜钦华在研究河南登封县颍阳新石器时代遗址时曾用孢粉分析与植硅石分析结合的方法对当地古人的自然环境进行了推测。该地土壤的花粉数量不大，禾本科花粉一般小于30微米，没有特征的水稻、谷子花粉，从限有的花粉组合仅能推测出禾草、蒿、藜及少量木本植

① Kurmann M H. An Opal Phytolith and Palynomorph Study of Extant and Fossil Soils in Kansas (USA). Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 1985, 49: 217－235. Piperno D R. Phytolith Taphonomy and Ditribution in Archaeological Sediments from Panama, Journal of Archaeological Science, 1985, 12: 247－267.

② 姜钦华：《花粉分析与植硅石分析的结合在考古学中的应用》，《考古》1994年第4期。

③ 姜钦华：《孢粉学与植硅石分析在考古学中的应用》，《"迎接二十一世纪的中国考古学"国际学术讨论会论文集》，科学出版社1998年版。

物的存在，木本花粉很少，推测这是当时人类刀耕火种农业活动的结果。但是，土壤中植硅石数量很大，推测古人曾用禾草叶秆混在黏土中建房或用禾草烧制陶器，植硅石组合中的大量扇型、少量哑铃型、十字型植硅石有可能表明农作物的存在。花粉分析和植硅石分析的结合在国内外都取得了显著的成绩。正如美国斯密斯热带研究所的 D. Piperno 博士期望的“植硅石、花粉和大植物化石的分析同步进行可能产生更有意义的结果。”[①]

（四）淀粉粒分析[②]

早在 19 世纪早期，很多生物学家就已经发现了不同植物的淀粉粒在形态上存在差异，但直到 19 世纪中期才由 Fritzsche 和 Schleiden 证实和确认了这种差异的存在。1913 年，Richert 发表了《不同属、种间淀粉的区别与特征》，他提供了来自世界各地 300 多种植物（包括大量的经济作物）的淀粉粒的形态描述和图片，证明了淀粉粒形态在植物分类方面的实用性。20 世纪 80 年代初，Ugent 等利用淀粉粒分析（Starch Grains Analysis）对秘鲁沿岸遗址中史前石制品的根茎作物残渍进行鉴定后，发现了红薯、木薯、姜芋和白薯的淀粉粒，使人们对秘鲁沿岸史前社会的经济方式和古人类食谱有了深入的了解。进入 20 世纪 90 年代以后，淀粉粒分析的论文大量涌现，研究对象也从石制品扩展到文化层的堆积物。淀粉粒分析近 20 年来主要在澳大利亚和中美洲地区植物考古中应用比较广泛。

淀粉是葡萄糖分子聚合而成的长链化合物，以淀粉粒（Starch Grain）的形式贮藏在植物的根、茎及种子等器官的薄壁细胞细胞质中。淀粉在造粉体中积累时，先形成淀粉粒的核心，称为脐点（Hilium），然后环绕着脐点由内向外沉积，形成许多明暗相间的同心轮纹，称层纹（Annular Striation Lamellae）。淀粉粒多呈圆球型、卵圆型或者多角型，脐点的形状有点状、线状、裂隙状、分叉状、星状等。脐点有的位于中央如小麦、蚕豆等，或者偏于一端如马铃薯、藕、

① Piperno D R. Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective. Florida: Academic Press, 1988.

② 该部分主要参考杨晓燕、吕厚远、刘东生、夏正楷：《淀粉粒分析在考古学中的应用》（待刊稿）。杨晓燕、吕厚远、刘东生、韩家懋：《粟、黍及狗尾草淀粉粒微形态特征及其在植物考古研究中的潜在意义》，《第四纪研究》第 25 卷第 2 期。

甘薯等。

淀粉粒在形态上有三种类型:单粒淀粉(Simple Starch Grain)只有一个脐点,无数的层纹围绕这个脐点;复粒淀粉(Compound Starch Grain)具有两个以上的脐点,各脐点分别有各自的层纹围绕;半复粒淀粉(Half Compound Starch Grain)具有两个以上脐点,各自脐点除有本身的层纹环绕外,外面还有共同的层纹。不同的植物淀粉在形态、类型、大小、层纹和脐点等方面各有特征。因此,可以根据淀粉粒的形态特征作为鉴定植物种类的依据之一。

淀粉粒的提取分石制品和沉积物两大类。从石制品上提取淀粉残渍时,先要在100倍立体镜下,用细针剔出石制品缝隙中的残积物或用去离子水帮助松动淀粉残渍。再用CsCl溶液将淀粉分离出来,清洗CsCl后,将分离出来的淀粉装片观察。从沉积物中提取淀粉残渍时,主要有三大步骤:第一,利用筛选悬浮等法抗絮凝及去除土质。第二,淀粉的提取。第三,淀粉装片待观察。

无论是来自石制品还是沉积物中的淀粉,装片后按照以下步骤进行观察:

(1)在放大200倍的偏光下扫描载玻片以确定淀粉颗粒位置。

(2)在放大500倍的情况下,每个样品记录100~150个颗粒。

(3)同时用偏光和非偏光观察。在非偏光下观察颗粒形态和特征,在偏光下观察消光的位置和特征。

(4)边观察边画出颗粒形态,并根据形态类型分类(图12.9)。

观察的内容包括:

(1)脐点。说明脐点在淀粉粒上的位置。有的淀粉粒脐点可以观察到,有的脐点观察不到。观察到的脐点具有哪种形态(点状、星状、裂隙状等)。

(2)层纹。如同脐点一样,有的层纹可见,有的层纹不可见,对层纹的特征进行描述。

(3)淀粉粒的二维特征。包括淀粉粒的形状(球型、椭球型、多角型、铃型、肾型等),同时测量淀粉粒的长度、宽度。

(4)描述淀粉粒消光的特征与位置。

与孢粉和植硅体相比,淀粉粒最大的区别在于很多植物种类的淀粉粒可以达到种(Species)一级的分辨率,因此它比只能达到科(Family)或者属

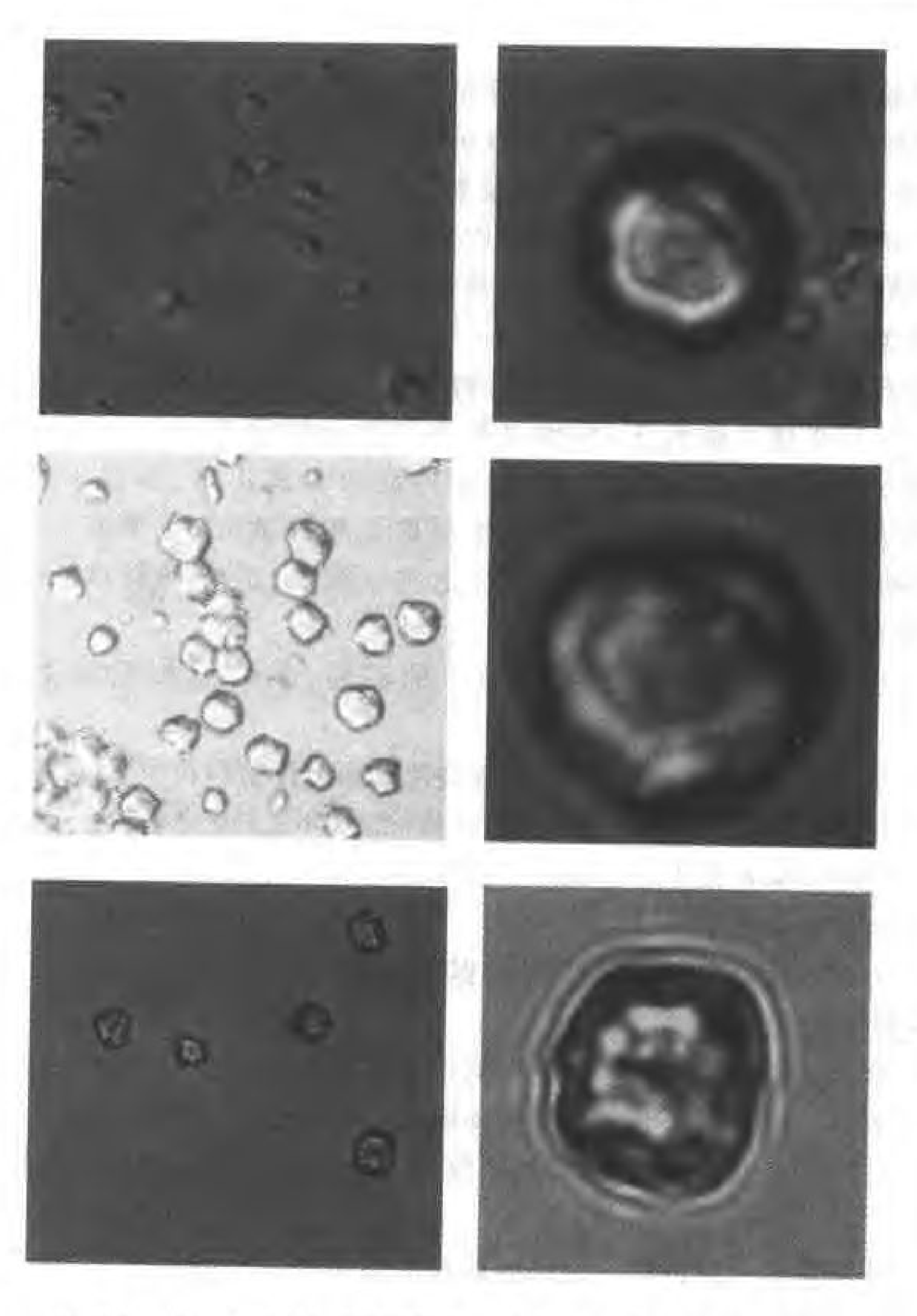


图 12.9 粟、黍和狗尾草的淀粉粒的形态特征(比例尺 10 微米)

采自杨晓燕等:《粟、黍及狗尾草淀粉粒微形态特征及其在植物考古研究中的潜在意义》,《第四纪研究》2005 年第 25 卷第 2 期。

(Genera)级的孢粉和植硅体在鉴定植物种属时具有更大的优越性。1998年，Therin等专门对土壤中淀粉粒的运移机理进行了研究，发现它同孢粉和植硅体一样，在土壤剖面中几乎不发生运动，即淀粉可以在考古遗物和地层中长时间保存；而且植物籽粒和果实中的淀粉粒数量极其丰富，针尖大的一块面团，就包含了成百上千个淀粉粒，这就为研究者从考古遗址中寻找淀粉粒提供了极大的方便。同时，淀粉粒研究弥补了利用上述几种植物遗存进行研究的不足，如分辨率不高、产量不高、保存不好等缺陷，可以更深刻地挖掘新的考古信息。

目前，淀粉粒分析在考古学中主要被应用于石制品功能分析和农业考古两个方面。

有些石制品上会残留有植物残渍，可以对其进行植硅体和淀粉粒分析，以确定其是否被使用和怎样被使用。例如在南美洲热带低地地带，大多数考古学家根据人类学的方法推断，考古遗址出土的一种小型石制品 grater teeth 是专门用来进行苦木薯加工的。2002年 Perry 对来自于委内瑞拉 Orinoco 中游盆地 Pozo Azul Norte - 1 遗址的一组 grater teeth 进行了微磨痕和淀粉粒分析，在这些石制品上发现了竹薯、土豆、姜以及棕榈类的淀粉粒，而没有发现苦木薯的淀粉粒，说明这种器形具有多种功能，以前对它的功能的推测很可能是错误的。

Piperno、Pearsall 等一批研究者，还将淀粉粒分析引入了美洲农业起源的研究中。关于美洲农业起源的时间和地点，学界一直都争吵不休。美洲农业到底是全新世早期开始的（距今 10 000—7 000 年），还是全新世中期（距今 5 000—3 500 年）开始的。20世纪90年代之前，根据^{14}C法、孢粉分析和植硅体分析等方法的结果，很多考古学家认为美洲农业开始于中全新世。1997年，一直支持中全新世起源说的 Smith 对 Flannery 当初发现的南瓜种子重新进行了 AMS 测年，结果却发现全部属于距今 10 000—8 000 年的遗存。紧接着 Piperno 和 Holst 仿照 Ugent 在秘鲁和 Loy 在旧大陆的研究，将淀粉粒分析引入在美洲的工作。他们对来自巴拿马太平洋分水岭中部四个遗址（Aguadulce Shelter、Monagrillo Shell Midden、La Mula 和 Cerro Juan Diaz）的石制品（时间跨度从距今 8 000 年—公元 700 年）表面残渍进行了淀粉粒分析，从中提取出了木薯、玉米、土豆和竹薯的淀粉粒，证明了农业栽培在美洲悠久的历史。尤其

是他们在巴拿马 Aguadulce Shelter 遗址的工作，不仅证明了在距今 10 000 年左右美洲农业的发生，还证明了木薯起源于中美洲低地的热带雨林地带，而不是以前所认为的巴西西南部。Piperno 等人还在 Aguadulce Shelter 遗址发现了栽培玉米的淀粉粒，证明了玉米在中美洲低地热带雨林地带悠久的种植历史。Pearsall 等利用淀粉粒分析在厄瓜多尔 Real Alto 遗址的工作，证明了在公元前 2800—公元前 2400 年时，玉米已经成为当地主要的农作物，而不是如 Staller 和 Thompson 利用植物大化石所得出来的玉米只是在公元前 2200—公元前 1900 年传播到厄瓜多尔。

最近，Piperno 等利用淀粉粒分析，对以色列 OholoII 遗址出土的一件距今 23 000—22 000 年的类似砧板的石制品进行了研究，目的是确定这件石制品是否用于研磨某些植物，研磨了哪种植物。研究者将石制品缝隙里的残渍进行处理，装片观察后发现，残渍里频繁出现大量野生大麦属及部分小麦属的淀粉粒，从而证明了大麦和小麦在被驯化前的 10 000 多年里，已经是人类重点采集的对象。这个研究同时还直接证明了此类石制品的功能。

三、农作物起源的研究

通过考古发现的植物遗骸，可以进行农作物起源的研究。众所周知，新石器时代的伟大革命是同农业紧密相关的；农业起源又与文明起源直接相关。整个旧石器时代数百万年中，我们的祖先靠采集野生植物果实和猎取野兽、捕捞水生动物为食，完全依赖于大自然所提供的食物资源。当人类历史发展到距今 10 000 多年时，因为某种自然原因或自然界与人类之间的矛盾发展，一些地区的远古人类逐渐学会了驯养动物和栽培植物，从而使自身的食物来源多元化，不再完全依靠大自然的赐予。这种食物生产方式的变化所导致的社会影响之深远是不难想象的，它最终使人类有了持久、可靠而且不断扩大的食物来源，从而促进了定居生活和人口增长以及不断扩大的社会组织，为人类文明奠定了坚实的基础。因此，这一变革被称为"食物生产革命"（Food-Producing Revolution）或"农业革命"（Agricultural Revolution）。农业与农作物起源问题长期是全球考古与历史学界关注的热点和讨论重点。所谓起源，一般指三方面，从农作物起源的角度讲是（某种）作物、起源时间、起源地点；从农业起源的角度讲，则为时间、地点及作物（种类）。下面介绍目前的讨论情况和

我国农作物起源的有关问题。

(一) 关于农业起源的地点、时间问题

关于农业起源的地点、时间问题是国际学术界普遍关心的研究课题。早在1935年,苏联学者瓦维洛夫(N. I. Vavilov)从遗传学演化角度提出作物变异的分布理论,提出了农业起源可能有八个中心,即东亚、印度、中亚、西南亚、地中海区域、东非、中美洲和南美安第斯山地区。东亚主要指中国,为第一起源中心,这一中心栽培植物种类最为丰富,共有136种,占全世界666种主要作物(粮食、蔬菜、果树等)总数的20.4%。瓦维洛夫的理论和观点在学术界流行了很长时间。

随着考古材料的发现,学术界对农业起源的观点在不断变化。对农业起源地的判别,一般应依据两个基本条件:一是必须发现有较早的可鉴定为栽培种的作物遗存;二是这些遗存应位于作物野生祖本的分布范围之内。

在西亚和中东,有关农业考古取得了很大的成就,发现了一些重要的遗址。如位于巴勒斯坦的耶利哥(Jericho Site)遗址,处于约旦河谷;遗址堆积从中石器时代经新石器时代、铜石并用时代、青铜器时代,一直延续到铁器时代。考古学家在距今9 000年前的前陶新石器时代文化层中发现了确凿的农作物遗存,包括100多件炭化谷物、豆类和水果的标本,还有一些泥砖上的作物印痕,其中有西亚代表性的农作物大麦和小麦。这里的发现有两点值得注意:一是在新石器时代,农业和制陶业并非同时出现,其中农业出现在前面陶器发明在后;二是早在栽培农业之前,人们就已大量采集野生大麦和小麦为食,并出现了泥砖叠砌的定居性房屋建筑,这在一定程度上打破了以往所谓只有农业发展到一定水平才会出现定居村落的观点①。

近年来,关于西亚的农作物讨论体现在新月沃地(Fertile Crescent)上。新月沃地指的是从伊朗的哑格罗斯山脉、安纳托利亚、叙利亚北部以及约旦河谷连接而成的新月形地带,这里资源肥美、降水充沛,是人类最重要的农业起源的摇篮之一。其之所以能够成为农业文明的摇篮的一个优势正是其植物群的丰富。其一,品种繁多。其二,由于气候变化大,促进了一年生植物的演化。该地占有了全世界56

---

① 世界上古史纲编写组:《近三十年来前陶新石器公社的发现》,《世界古代史论丛》(第1辑),三联书店1982年版,第42—52页。

种最有价值的野生植物中的32种，包括小麦、大麦。其三，该地短距离内地形高度上富于变化。这样就错开了植物的成熟期，并演化出适应性很强的植物系列。其四，因为该地没有丰富的水产品，在采集与狩猎资源短缺遂开始向农业转化时，没有与之竞争的其他生存方式。

考古材料显示，人类的农业在距今11 000年前始于新月沃地，这里的纳土夫文化进入新石器时期，当时人广泛种植小麦、大麦，考古发掘出的镰刀、石质或陶质的贮藏室也说明当时农业的发展情况。

由于西亚发现了最早的农业遗存，相当多的学者据此认为，世界各地的农业文化都是从西亚这个唯一的起源地出发，像缓慢移动的波浪逐渐传播到世界各地。到公元元年原产于新月沃地的谷物已经贯穿欧亚大陆，甚至从大西洋上的岛国爱尔兰直到太平洋岛国日本。但是，在最近的二三十年间，随着中美、南美、北非、南欧、东亚和东南亚等地区考古工作的深入开展，大量的考古新发现表明，人类在上述地区开始从事生产性经济的时间远比以往所猜想的要早得多。不仅如此，不同地区作物类型之间存在的显著差异，也使得研究者们逐渐认识到农业起源可能是多源的，至少西亚和中东、中美洲、东亚等地区都是相对独立的农业革命中心。

农业起源、栽培农作物起源的时间和地点，是美洲考古学界始终关注的重要问题。20世纪60年代，Flannery在墨西哥东南部瓦哈卡的一个山洞里发现了栽培南瓜(*Cucurbita pepo*)的种子。利用^{14}C方法对与种子同一层位的木炭进行测年，从而将美洲农业起源的时间上推至距今10 000年。在特瓦坎(Tehuacan)遗址公元前6000年—公元前5000年的文化层中，发现有人工种植的西葫芦、鳄梨等；公元前5000年—公元前3000年的文化层中出现了玉米(图12.10)、菜豆、南瓜等栽培作物，并出土有加工粮食的磨盘、磨棒等。孢粉分析发现，在墨西哥有早到距今8 000年前的野生玉米花粉，从而表明，这里是玉米野生祖本的原生地①。

在东南亚地区，近百年来虽然不断有人研究，但目前还没有发现像耶利哥、特瓦坎那样时间较早而证据可靠的农业遗存。在泰国东北部属于和平文化的仙人洞遗址(距今11 000年)发掘中，曾发现有扁豆、葫芦、黄瓜等植物种子，但是否为栽培种尚不能肯定。据调查，这一地区现在还分布有至少8种薯类野生品种，故有的

① 黄其煦：《裴李岗、耶利哥与特瓦坎——农业起源问题探索之二》，《农业考古》1983年第1期。



图 12.10　特瓦坎遗址发现的系列玉米遗存（右一为现代样品变种）
Feder K L, Park M A. Human Antiquity—An Introduction to Physical Anthropology and Archaeology. California: Mayfield Publishing Company, 1996.

学者认为，芋、薯类等块根、块茎作物可能起源于东南亚地区[1]。有人进一步推测，在这一地区，芋、薯、香蕉、甘蔗等无性繁殖的作物栽培可能早于谷类作物。此外这里的石器、住居及采集的食物等均具有共同的特征，而不同于西亚和中美洲的文化[2]。

综上所述，农业的发生最早大约在公元前 10000 年前后。与此同时，自史前时代开始，由于世界各地明显存在着环境和文化传统方面的差异，文化的发展进程也极具不平衡性。又由于世界各地动植物资源所存在的差异，使得人们在各地选择栽培植物和驯养动物的种类也各不相同，史前农业出现的时间也有早有晚。因此，在世界范围内，农业的起源无疑应是多元的，至少应存在着几个相对独立的发生、发展和演化中心。

① 参阅［美］费根：《地球上的人们》，文物出版社 1991 年版，第 320—322 页。
② 参阅童恩正：《略述东南亚及中国南部农业起源的若干问题》，《农业考古》1984 年第 2 期。

（二）中国农作物起源的有关研究

1. 关于中国粟、黍的起源

粟（Setaria Italica）和黍（Panicum Miliaceum）是中国北方早期主要的栽培作物，它们具有耐旱、抗寒、易耕作等优点，因而很适合在黄土地带种植，是滋养中华文明的主要食物来源之一 。

学术界一般认为粟原产于中国。中国粟与非洲几内亚的分枝粟和塞内加尔的珍珠粟不源于同一祖本。非洲几内亚的分枝粟和塞内加尔的珍珠粟都源于象牙海岸的龙爪粟。中国粟，植物学家们认为其祖本是狗尾草。狗尾草在亚洲地区分布很广，中国的黄河流域更是多见。野生狗尾草广泛分布于黄河流域和北方黄土高原地区，与粟易于杂交，田间常见的一种谷莠子，便是粟与狗尾草杂交后形成的一种中间类型的后代。在旧大陆的栽培作物起源的几个重要地区如西亚、中美等地，均没有发现粟类作物；欧洲发现的最早的粟为公元前 3000 年。因此，我国黄河流域出土的粟，是目前世界最古老的栽培粟类实物遗存。

在黄河流域的考古工作中，发现了许多粟的遗骸。华北地区约公元前 6000 年以后的各新石器时期遗址中普遍发现有粟，如磁山遗址不但出土了石镰、石磨盘、石磨棒等与粟作文化有关的生产工具，尤为重要的是发现了 88 座贮藏粟的窖穴，窖穴里一般堆积着很厚的炭化或腐朽的粟堆积，其中 10 个窖穴内的堆积厚度超过 2 米，部分粟粒出土时尚可清晰地分辨形状。该遗址的年代为公元前 6005—公元前 5948 年，即距今 8 000 年左右。

迄今为止，考古发现年代最早的黍是甘肃秦安大地湾一期文化遗存中出土的少量炭化黍种子。其^{14}C 年代经树轮校正，距今约 7 150 ± 90 年。在该遗址中还发现石器、骨器、角器等生产工具 60 余件，如石刀、石铲、石斧等，这些均表明，大地湾文化一期已经是发达的农业经济，黍是其栽培的主要作物之一。

除大地湾外，在裴李岗、新乐、姜寨等遗址均发现了黍实或者黍灰。在马家窑类型东乡林家 F8 内发现炭化粟、黍和大麻籽同出。大地湾一期文化层中发现黍，距今 8 000 年左右，是目前可确认的最早的黍遗存。黍的原始祖型是野生黍，在我国北方地区到处都有分布，今天西北半干旱地区仍在普遍种植。既然我国北方既有广泛分布的野生粟、黍，又发现了年代最早的与定居生活密切相关的粟、黍实物，那么说这两种农作物的栽培首先发生在我国北方地区应当距事实不远。

2. 关于稻的起源

水稻也是中国古代最早的栽培作物之一，属于“亚洲稻”。关于亚洲稻亚种的分类，各国学者存在着一些不同的看法。早在1928年，日本学者加藤茂包就曾将亚洲稻分为印度型亚种（长型）和日本型亚种（圆型），并为国外学术界采用。中国农业科学院著名农史学家丁颖先生经过长期研究之后，他认为籼、粳稻同属一个祖先，籼稻是基本型，粳稻是变异型，它们主要是因栽培地带温度高低不同而分化形成的地理的气候生态型；在早、晚稻中，晚稻是基本型，早稻是变异型，它们是季节的气候生态型；在水、陆稻中，水稻属基本型，陆稻是变异型，它们是土地生态型或称土壤生态型①。

20世纪50年代以来，中国就陆续有稻谷的发现，至今已有近150处水稻遗存发现，基本集中在长江中下游地区。1973—1974年发掘河姆渡遗址时，在第4层（约距今7 000年）约400平方米的范围内发现有大量的稻谷、稻秆、稻叶，有的地方厚达20～50厘米；谷壳和稻叶保存完好，有的稻叶色泽如新、叶脉清晰，有的颖壳上连稃毛也清晰可辨。经浙江农业大学鉴定为栽培稻籼亚种晚稻型水稻，有的学者则认为可能还有粳稻存在②。余姚河姆渡遗址出土了早于印度和东南亚的稻谷遗迹之后，中国的长江流域及华南地区又成为学者们关注的焦点。

后来的一些发现更加惊人，1988年发掘的湖南澧县彭头山遗址（距今8 500—7 800年）中发现了更早的稻谷遗存，在一些红烧土块中夹杂有许多稻壳，有些陶器也是掺和稻壳碎屑烧成的；经初步观察为栽培稻，但品种尚待正式鉴定③。同时，在彭头山还发现有水稻花粉，卵圆形，个体37.5～40微米，具单孔，孔较大，边缘加厚，孔径连加厚的边缘约10～12微米，花粉轮廓线较清楚，表面光滑。从进化的观点来看，彭头山的这些水稻花粉与浙江河姆渡发现的水稻花粉形态一致，与现代水稻接近④。尤其重要的是，在属于彭头山文化的湖南澧县八十垱遗址也发现

---

① 参阅丁颖：《中国栽培稻种的起源及其演变》，《稻作科学论文选集》，农业出版社1959年版。

② 周季维：《长江中下游出土古稻考察报告》，《云南农业科技》1981年第6期。

③ 《湖南对彭头山遗址进行正式发掘》，《中国文物报》1989年2月24日；《湖南省澧县新石器时代早期遗址调查报告》，《考古》1989年第10期；严文明：《中国史前稻作农业遗存的新发现》，《江汉考古》，1990年第3期。

④ 湖南省文物考古研究所、澧县文物管理所：《湖南澧县彭头山新石器时代早期遗址发掘简报》，《文物》1990年第8期。

了大量炭化的稻谷和稻米，总数大约1.5万粒，是迄今中国史前遗址出土炭化稻谷和稻米最多的一个地点。经对373粒稻谷和稻米做形态分析研究，认定八十垱的稻谷遗存是一群籼、粳、野特征兼有的小粒种类型，而且是一个正在向籼、粳演化的多向分化群体①。据此可以断定，彭头山文化已有了早期的稻作农业。彭头山文化出土的稻作遗存不仅是我国，也是世界上目前已知早期最丰富的稻作农业资料。

1983—1987年发掘的河南舞阳贾湖遗址（属裴李岗文化，距今8 942—7 801年）中，在一些灰土中发现许多炭化稻类籽实（图12.11），在一些红烧土块上也发现有稻壳印痕，经鉴定为粳稻（74.4%）和籼稻（23.3%），并有一粒野生稻②。

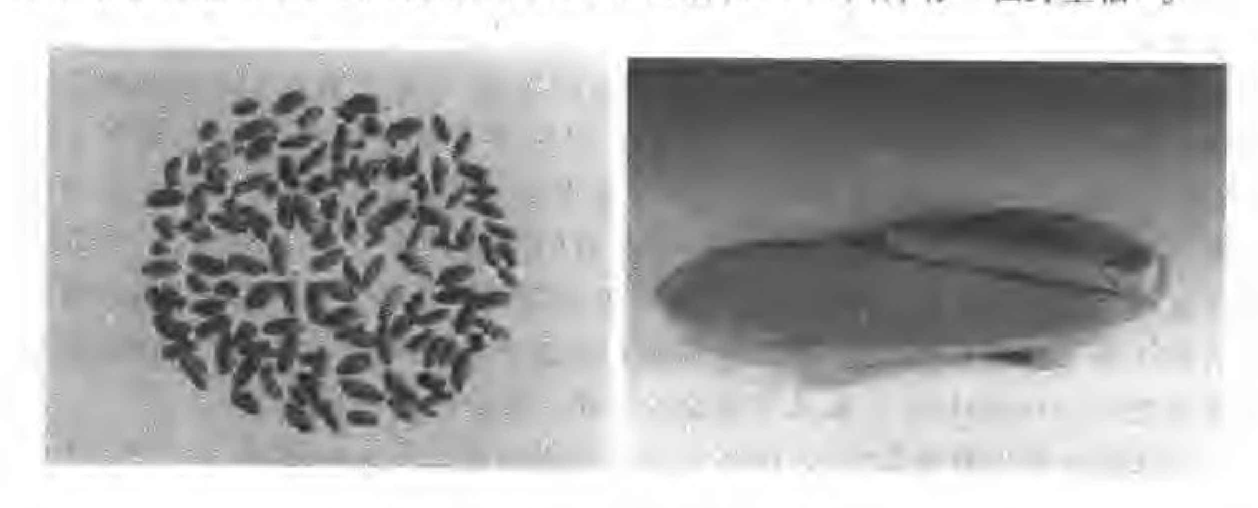


图12.11　舞阳贾湖出土的古稻和石磨盘、石磨棒

近年来江西万年仙人洞和吊桶环两个遗址以及大约同一时期湖南道县玉蟾岩遗址的发掘，都为探索稻作农业的起源提供了初步线索。仙人洞是一个洞穴遗址，其附近的吊桶环是一个临时营地兼作猎物屠宰场的自然岩棚。在这两地的发掘发

---

① 湖南省文物考古研究所：《湖南澧县梦溪八十垱新石器时代早期遗址发掘简报》，《文物》1996年第12期；裴安平：《澧县八十垱遗址出土大量珍贵文物》，《中国文物报》1998年2月8日；张文绪、裴安平：《澧县梦溪八十垱出土稻谷的研究》，《文物》1997年第1期。

② 河南文物考古研究所：《舞阳贾湖遗址的试掘》，《华夏考古》1988年第2期；《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至六次发掘简报》，《文物》1989年第1期。张居中、孔昭宸等：《舞阳史前稻作遗存与黄淮地区史前农业》，《农业考古》1994年第1期。

现了旧石器时代晚期、中石器时代和新石器时代早期三个时期的堆积①。在中石器时代的吊桶环中层内G层，突然出现大量野生稻植硅石，仙人洞下层也发现有野生稻植硅石，说明这时人们大量采集野生稻并以之为食物主要来源。到新石器时代早期，吊桶环上层（即B～E层）和仙人洞上层，^{14}C测年约公元前1.4万—公元前9000年（未校正），该层最显著的特点是栽培稻、磨制石器和陶器共存。仙人洞上层出土了近似栽培稻的植硅石，吊桶环上层内自下而上各小层野生稻和栽培稻植硅石的比例发生变化，下部的E、D层稻属植硅石野生稻、栽培稻大约各占一半，至中部C层的栽培稻植硅石比野生稻的多得多，上部B层出土大量稻属植硅石可能都属栽培稻②。这说明新石器时代早期开始出现栽培稻时但仍继续大量采集野生稻，两者比重随年代发生转化，直至栽培稻完全取代野生稻。仙人洞的全部剖面中，禾本科划分自下而上渐增；而吊桶环上层的禾本科植物也陡增，花粉粒度较大，接近于水稻花粉的粒度。玉蟾岩也是一个洞穴遗址。地层堆积厚1.5米，共分六层，第2层之下为文化层，测定年代约为公元前1.2万年—公元前1万年，发现有烧火堆、打制石器、骨角器、少量的夹砂粗陶器，以及大量半石化的陆水生动物遗骸和植物果核等。最重要的是还在近底层发现公元前1万年左右的稻谷4枚，经鉴定兼有野、籼、粳稻综合特征，是野稻向栽培稻演化的最原始的古栽培稻类型。这也是目前世界上最早的栽培稻实物标本。同时，土样分析表明也存在水稻硅酸体，说明已开始少量栽培最原始的水稻③。这一发现对探讨史前稻作农业的起源具有重要价值。

目前的考古材料显示，早在史前时代中国的长江流域及其以南地区就发展出了较成熟的稻作农业。史前稻作农业经历了从起源、产生、发展，到成熟的全过程。在大约公元前1万年前，普通野生稻广泛生长于长江流域及其以南地区，中石器时

① 刘诗中：《江西仙人洞和吊桶环发掘获重要进展》，《中国文物报》1996年1月28日；刘诗中：《万年县仙人洞、吊桶环旧石器晚期至新石器时代早期遗址》，《中国考古学年鉴》，文物出版社1996年版；彭适凡：《江西史前考古的重大突破——谈万年仙人洞与吊桶环，发掘的主要收获》，《农业考古》1998年第1期；刘诗中等：《万年县仙人洞石器时代遗址》，《中国考古学年鉴》，文物出版社2000年版；严文明、彭适凡：《仙人洞与吊桶环——华南史前考古的重大突破》，《中国文物报》2000年7月5日。

② 赵志军：《吊桶环遗址稻属植硅石研究》，《农业考古》2000年第3期；张驰：《江西万年早期陶器和稻属植硅石遗存》，《稻作、陶器和都市的起源》，文物出版社2000年版。

③ 袁家荣：《道县玉蟾岩石器时代遗址》，《中国考古学年鉴》，文物出版社1996年版；袁家荣：《玉蟾岩获水稻起源重要新物证》，《中国文物报》1996年3月3日；袁家荣：《湖南道县玉蟾岩1万年以前的稻谷和陶器》，《稻作、陶器和都市的起源》，文物出版社2000年版。

代人们就初步熟悉了野生稻的生长规律，逐渐对野生稻进行人工干预，但并未达到把野生稻驯化的程度。到新石器时代早期，在对野生稻的反复人工选择的基础上，野生稻的遗传性状逐步被改变，初步驯化成功，基本形成稻属栽培种，即原始栽培稻。原始栽培稻兼备籼稻、粳稻和野生稻的特征，是一种由野生稻向现代栽培稻演化中的古栽培稻类型，在演化史上具有一个亚种的全部特点①。

吊桶环和仙人洞发现新石器时代早期的水稻植硅石资料反映出，远古先民在初步掌握培育栽培稻的技术以后，相当长时期内仍不同程度地继续采集、食用野生稻，人工栽培稻比重开始时可能比较微弱，处于辅助地位，后逐渐超过野生稻以至占据主导地位。可见，稻作农业起源于人们对野生稻的培育驯化。掌握了人工培育驯化野生稻的技术以后，栽培稻的种植才有可能进行，史前稻作农业的起源也才能有最基本的条件和基础。中国的史前先民对野生稻的驯化早在中石器时代就开始了，野生稻的初步驯化成功标志着新石器时代的到来，新石器时代早期阶段是史前稻作农业的起源阶段。就目前的现状而言，可以认为大约万年前长江中下游地区是中国稻作农业起源地的范围，古代先民已经把野生稻培育、驯化成栽培稻。中国史前稻作农业生产工具不断改良，生产方式不断改进，从最早的刀耕火种农业发展到耜耕农业再发展到犁耕农业，其间大约经历了 5 000 年的发展历程。新石器时代晚期已培育成功了较稳定的籼稻和粳稻两种作物品种，粮食产量大为增加②。

可见，中国是亚洲栽培稻起源地之一，它与另一个亚洲栽培稻起源地南亚（以印度为中心）是两个各自独立起源和演化的系统。中国在玉蟾岩发现的栽培稻谷壳实物和在吊桶环发现的栽培稻植硅石，都是世界上目前已知同类最早的实例。由于在长江流域及华南广大地区发现了数量众多、年代最早的稻谷遗存，加上这一地区有野生稻分布，使得国内外越来越多学者倾向于中国南部是亚洲稻的起源与演化中心这一看法。

虽然国内外多数学者主张亚洲稻起源于中国，但在具体的起源地问题方面，却存在着不同的看法。大体说来主要有以下几种假说：云贵高原说、华南说、长江下游说。就目前的考古发现而言，似乎对“长江下游说”（或可包括长江中游）较为有利，而“云贵说”和“华南说”则有待于考古发现的进一步证明。由于长江中游发现

① 张文绪：《中国古栽培稻的研究》，《农业考古》1998 年第 1 期。

② 吴耀利：《中国史前稻作农业的成就》，《农业考古》2005 年第 1 期。

有公元前10000年前后的稻作农业遗存，以及淮河上游的河南舞阳发现了几乎与彭头山遗存同时的栽培稻和野生稻遗存，使人们不得不对稻作农业起源和南北文化交流的历史重新进行评价。相信今后随着更加仔细的考古发掘和多学科研究的不断深入，逐渐会使稻作农业的起源问题日趋明朗化。

3. 中国农业起源的"三条线模式"

过去，学术界一般认为中国农业起源存在两种模式，即以黄河流域为起源地的粟、黍旱作物农业经济文化形态和以长江流域为起源地的稻作农业经济文化系统。两个农业经济文化区分别形成了各自的作物栽培和家畜饲养种类体系，以及与之相适应的耕作栽培技术等文化因素。

中国史前稻作和粟作农业两个经济文化区有相互毗邻、相互影响、相互交流和共同发展的特点。史前稻作和粟作农业的发生发展，为中国古代文明的起源与形成提供了坚实可靠的物质基础，并奠定了文明发生发展过程中的基本特点。

最近，甑皮岩遗址的植物分析使这两个模式遭到质疑，并被代替。

甑皮岩遗址曾被认为是华南地区乃至世界上最早出现稻作农业的考古遗址，但根据科技考古工作的浮选结果并结合植硅石分析发现，甑皮岩人不仅没有种植稻谷，甚至在其采集业中也不包含野生稻资源。然而，在浮选结果中却发现了较为丰富的炭化块茎植物遗存，通过对遗址生态环境的分析，再结合其他考古现象，学者们认为甑皮岩虽然与稻作农业无关，但不排除存在其他形式原始农业的可能性，具体讲，甑皮岩人有可能已经开始种植根茎繁殖类栽培作物。

中国考古学家通过对河南舞阳贾湖、内蒙古赤峰兴隆洼及岭南等地区、广西桂林甑皮岩等一系列古代遗址进行植物考古学研究后，提出了中国原始农业起源的"三条线模式"。即在距今10 000—6 000年前的中国，除北方地区旱作农业、长江流域稻作农业之外，还有另一种原始农业形式的存在——华南地区块茎类作物农业。

第四节 古代人类食性研究

考古学家越来越关心古代人类生活的方方面面，对古人饮食的考察就是其中之一。我们知道，维持人类生存的食物及其结构对人类体质和健康的影响是不言而喻的。

自20世纪60年代起，国外学者就开始了对古代人食性的研究。数十年来，这个领域的工作已经取得相当成效，如解决了美洲玉米的起源和传播、日本稻作的引进与流传等。我国最早对古人类食物结构研究则始于20世纪80年代初，蔡莲珍、仇士华等通过对仰韶、陶寺等著名考古学遗址出土的人类和动物骨骼的^{13}C同位素进行分析研究，得出至少从新石器时期以来，中国北方主要以小米为主，而南方以稻米为主的结论①。

由于古代人类的饮食极少能留存至今，所以对其研究主要是通过对现有考古遗存中有关材料间接进行。其研究方法包括：

第一，通过考古遗物中的生产工具及生活用具来推测当时如何获得食物来源并进行加工，如石球作为投掷野兽的工具，石磨盘、磨棒是用于粮食加工的。

第二，利用调查得到的未食用完的或遗存中发现的各种食物遗存来推测当时吃了什么。贝壳、骨头、各种粮食种子能提供这方面信息。还可以应用痕量分析方法对炊器、饮食器等器物中发现的残留物进行分析研究，由其成分推断其食物构成。

第三，利用生物科学和其他科学的理论、仪器分析对遗物、遗存进行测定，根据所得数值来复原古代人的饮食生活和饮食结构。如应用动物骨骼鉴定、孢粉分析等方法对动物、植物遗存分析研究，鉴别其类别、种属，以推断人类食用动植物的情况。

第一种方法是传统考古学长期以来所使用的方法，已经取得了不少收获，但仍然存在一些不能确定的方面。例如，石磨盘、石磨棒用于加工粮食的，这一点应无疑问。但是，古人用这些工具加工的是什么谷物？是稻谷还是粟类？或者两者都有？即使通过对遗存中与食物生产与加工有关的工具的种类及数量来推断古人的食物种类，但我们还是无法确定肉食、粮食、果蔬等在整个食谱中所占的比例。因此，传统的方法在深入探讨古代先民食谱研究是难当重任的。

第二种、第三种是科技考古工作者所要承担的工作。人类对食物的摄取，不外乎植物、动物。前面已经论述了动物考古、植物考古的一些内容，在此介绍几种获取人类食性的几种方法和取得的成果。

---

① 蔡莲珍、仇士华：《碳十三测定和古代食谱研究》，《考古》1984年第10期。

一、碳－13(^{13}C)测定法、氮－15(^{15}N)法及其应用

骨胶原中可分析的稳定同位素比较多，但较常用的且比较成熟的是碳－13(^{13}C)、氮－15(^{15}N)这两种。

碳元素的同位素^{12}C、^{13}C、^{14}C中^{12}C轻而活泼，易渗入有机物中，而^{13}C、^{14}C在无机物中含量较多。^{13}C测定法是将各类物质中碳同位素组成的差异同标准物质的同位素进行定量比较而得出结果。我们知道，不同种类的植物具有不同的特定碳同位素比率，当植物被动物和人消费时，该植物的比率就固定在动物和人类的骨骼组织中。所以，可以通过对骨胶质的分析来推断植物的种类。一般地，用遗址里植物残存的$^{13}C/^{12}C$比值同国际上运用的PDB(Peedee Belemnite Chicago Limestone Standard)标准的$^{13}C/^{12}C$比值的千分差值表示该物质的^{13}C同位素丰度与标准物质的差值$\delta^{13}C$值，$\delta^{13}C = [(^{13}C/^{12}C)_{标本} - (^{13}C/^{12}C)_{标准}]/(^{13}C/^{12}C)_{标准} \times 1000‰$①。

植物在光合作用过程中，途径不同而造成最初的产物不同，其$\delta^{13}C$值不尽相同。卡尔文途径(Calvin Pathway)的最初产物是3－磷酰甘油酸(3－PGA)，一般称为C_3化合物，最初生成的植物称为C_3植物；哈－斯途径(Hatch－Salck Pathway)的最初产物是苹果酸(Malic Acid)和天冬氨酸(Aspartic Acid)等C_4化合物，最初生成的这类植物称为C_4植物；CAM(Crassalacean Acid Metabolism)途径产生少数多汁植物。植物的$\delta^{13}C$值不因科属而异，同一种植物的$\delta^{13}C$值有一定范围(表12.4)。经光合作用产生的植物，通过食物链进入动物体内。人类长期食用某类植物，体内就会富集相应数值的$\delta^{13}C$。但由于人体组织在消化、吸收过程中对植物的分馏效应(所谓同位素分馏效应指化学性质相同而原子质量不同的同位素在参与各种化学和生理变化过程中，由于活泼程度不同使反应前后的同位素组成发生变化②)，造成人体组织与所食植物的$\delta^{13}C$值有别。实验证明，人体组织的各个部分的分馏效应不同，人体肉质部分对于所食植物的分馏效应约为

---

① 周本雄：《考古植物学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社1986年版，第255页；蔡莲珍、仇士华：《碳十三测定和古代食谱研究》，《考古》1984年第10期。

② 张雪莲等：《古人类食物结构研究》，《考古》2003年第2期。

+1‰,骨胶原约为+5‰,皮肤可能会更高些[1]。这造成人体组织的各个部分$\delta^{13}C$不同。

表12.4 不同类别植物的$\delta^{13}C$值

植物类别	$\delta^{13}C$值范围(‰)	$\delta^{13}C$平均值(‰)
C_3类植物(稻米、小麦)	-23 ~ -30	-26
C_4类植物(玉米、小米、高粱)	-8 ~ -14	-11
CAM类(菠萝、甜菜等)	-12 ~ -23	-17

对于人类或动物而言,直接或间接地食用各种植物,其$\delta^{13}C$值主要依赖食谱的$\delta^{13}C$值,同时发生的分馏效应可以忽略。也就是说,在植物里,$^{13}C/^{12}C$的比率主要取决于被研究植物的种类;动物里,$^{13}C/^{12}C$的比率主要受动物(包括人类)所吃食物的影响。根据这个原理^{13}C测定法可以提供古代人类的食谱和动物摄食习性的信息,了解当时农作物的种类、农业的起源,反映古代耕种业、农业经济形态、植物状况。

氮同位素比值也可提供人类饮食方面的信息。所有的蛋白质中都含有氮,当它经过食物链时也发生分馏。N的两种同位素$^{15}N/^{14}N$比率与标准进行(^{15}N的比较标准一般为大气)比较,用$\delta^{15}N$表示。$\delta^{15}N=[(^{15}N/^{14}N)_{标本}-(^{15}N/^{14}N)_{标准}]/(^{15}N/^{14}N)_{标准}\times 1\ 000‰$。

人体对氮的吸收主要有两种形式,一种是通过食用豆科类植物的固氮吸收,另一种是通过食用非豆科类植物、陆相动物、海洋生物等直接吸收已转化了的氮的化合物。$\delta^{15}N$与生态环境中植物氮的来源有关,其值取决于食谱中蛋白质的含量,豆科植物$\delta^{15}N$值低,为0~1‰,非豆科类植物$\delta^{15}N$值为+3‰;海洋豆类植物(蓝绿藻)的$\delta^{15}N$值为0~1‰,海洋非豆类植物(水生植物)的$\delta^{15}N$值在7‰左右;海洋动物的$\delta^{15}N$值约15‰,陆相食草动物的$\delta^{15}N$值约为6‰。人体骨胶原对于所食食物分馏效应的$\delta^{15}N$值差别约为3‰。陆相食肉动物与食草动物之间的差值约为3‰,每一营养级之间$\delta^{15}N$值差别约

① Iacumin P. Stable Carbon and Nitrogen Isotopes as Dietary Indicators of Ancient Nubian Populations (Northern Sudan). Journal of Archaeological Science, 1998, 25:293-301.

为3‰。总之，海相动植物的$\delta^{15}N$值一般高于陆相的；海相或陆相本身的动植物之间，其$\delta^{15}N$值一般与食物链的长度、营养级有关。食肉类的高于食草类的，植物中非豆类的高于豆类的。

图12.12是日本学者绘制的一张有关日本的背景资料的^{13}C、^{15}N分析结果图，以$\delta^{13}C$为横坐标，以$\delta^{15}N$为纵坐标。当然，由于各地区的环境不同，反映在图中的范围相应是有些差别的①。

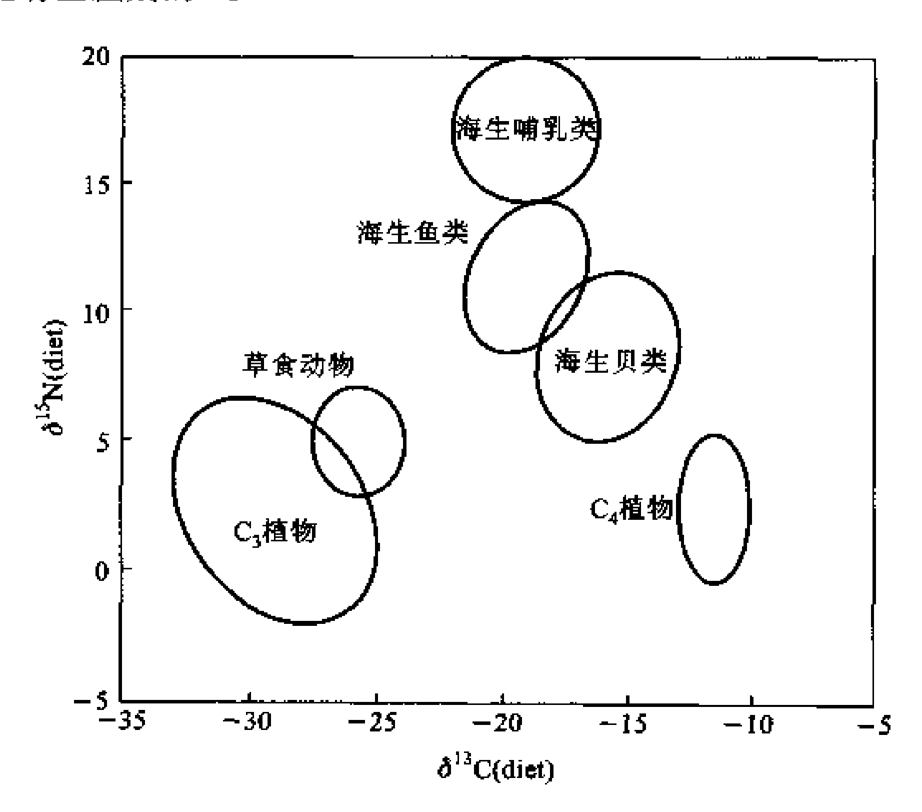


图12.12 日本学者研究得到的背景资料图

采自张雪莲等:《古人类食物结构研究》,《考古》2003年第2期。

^{13}C测定法和^{15}N法的工作程序②是：

---

① 张雪莲等:《古人类食物结构研究》、《考古》2003年第2期;张雪莲:《应用古人骨的元素、同位素分析研究其食物结构》,《人类学学报》2003年第22卷第1期。

② 胡耀武等:《古代人类食谱研究现状》,《科技考古论丛》(第2辑),中国科学技术大学出版社2000年版,第51—58页。

（1）用超声波清洗骨骼，去除粘连的灰尘及污染物。

（2）烘干，粉碎成粉末。用0.5MHCL浸泡数天，去除可溶于酸的无机物质。

（3）用蒸馏水清洗至中性，换用2% NaOH浸泡，去除腐殖酸。

（4）用蒸馏水清洗至中性。换用浓度较稀的酸（pH = 3），90℃烘箱中放置12～24小时，使骨胶质充分水解。冷冻干燥后，便得到骨胶质样品。

（5）将骨胶质样品加入到元素分析仪中，通过充氧条件下的燃烧，使之氧化为气体，再经还原装置，生成还原气体 CO_2 和 N_2，这些气体分别经过相应的色谱柱，再经吸附、解吸过程，流出元素分析仪后进入气体收集系统（根据不同的流出时间、不同的冷凝温度等条件来控制获取不同的气体）。用制谱计测得 $^{13}C/^{12}C$、$^{15}N/^{14}N$ 比值，再利用标样值换算出样品的 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值。

国外用 ^{13}C 测定法对美洲南部、非洲南部和欧洲的一些地区进行了研究。除了进行古代饮食方面的研究外，用 ^{13}C 法还可以验证某些部落是不是游牧民族（农民和牧民的摄食习惯、种类显然不同），甚至讨论某一地区的饮食资源可供给人口的最大极限。① 我国运用 ^{13}C 法可以进行许多工作，如可以了解我国生产、食用粟黍的时空分布，以及各地摄食习惯的改变和改变年代，根据动物骨骼的 $\delta^{13}C$ 值还可判断是家畜还是野生。此外，不同等级、不同性别、不同年龄的人有不同的食谱，$\delta^{13}C$ 值可提供诸如此类的旁证②。在舞阳贾湖遗址的研究中，对9个墓人骨标本在作 ^{14}C 测年的同时，进行了 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 分析，表明当地人当时以稻米和采摘来的果实等为植物性食品来源③。中国社会科学院考古所的张雪莲、仇士华等人，利用 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 法分析了殷墟、琉璃河西周遗址、青海上孙家卡约文化遗址、兴隆洼新石器时代遗址等遗址的样品（图12.13），结合夏商周断代工程其他遗址的样品结果和背景材料，探讨、比较了各遗址、各地区之间的古人类食性结构状况，$\delta^{13}C$ 数据及分析结果显示：中原一带、黄河流域以 C_4 类为主食，长江流域、江南、华南一带以 C_3 类为主食，青海、新疆等牧区环境以及华南的贝丘遗址又各有不同。$\delta^{15}N$ 数据说明，殷墟先民以农作物为主食，青海人食用较多的食草类动物、家畜饲养的可能性较大，崧泽人、河姆渡人、山东长岛人、新疆焉不拉克人的肉食比例较高，他们食

① 李士、秦广雍：《现代实验技术在考古学中的应用》，科学出版社1991年版，第281页。

② 蔡莲珍、仇士华：《碳十三测定和古代食谱研究》，《考古》1984年第10期。

③ 河南省文物考古研究所编著：《舞阳贾湖》（下卷），科学出版社1999年版，第895—896页。

用家畜和鱼类；烟台海域的 $\delta^{15}N$ 值稍低于青岛海域的，应与两地域海水温度、海洋动植物的丰富程度等海洋环境有关。$\delta^{13}C$ 值、$\delta^{15}N$ 值给出的分别是食物结构中的植物、食肉情况，两者的结合反映了更完整的信息，如青海上孙家与兴隆洼人的 $\delta^{15}N$ 值相近程度大，表明两者有一定量的肉类食人，由此推测有一定的家畜饲养；但两地的 $\delta^{13}C$ 值明显不同，兴隆洼遗址的 $\delta^{13}C$ 值偏向 C_4 类，暗示所处的社会为定居的农耕社会，家畜可能是圈养，上孙家遗址的 $\delta^{13}C$ 值偏向 C_3 类，可能与两种因素有关，一为 C_3 类作物的种植或采集，一为游牧或两者兼有。家畜以牧养的可能性为大。①

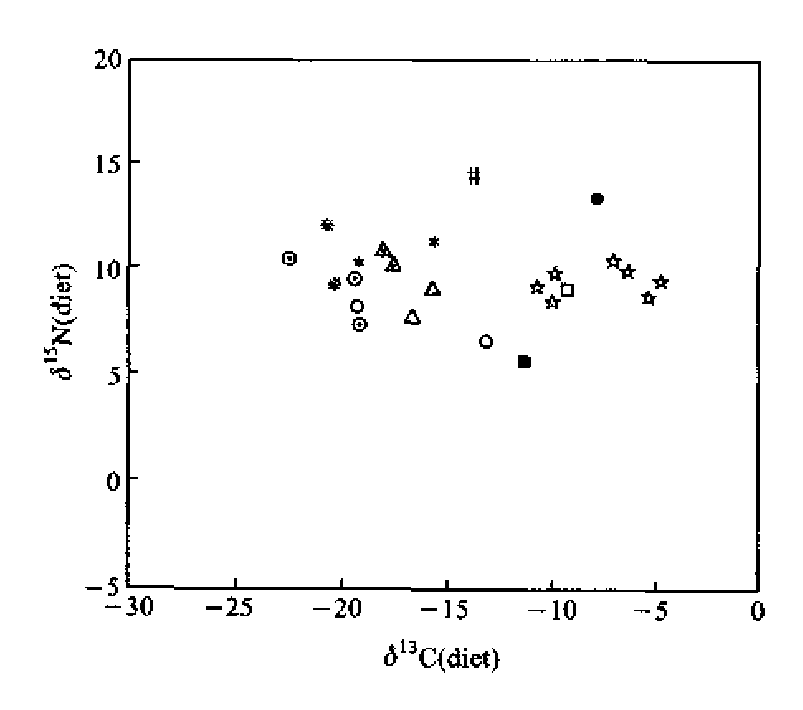


图 12.13　各遗址的 ^{13}C、$\delta^{15}N$ 结果图

△青海上孙家－卡约；△青海上孙家－汉代；●山东长岛；■殷墟；□山东古镇度；☆兴隆洼；* 河姆渡；※青浦－崧泽；○ 烟台贝类；⊙ 青岛贝类；# 新疆焉不拉克

同位素分析法可以提供人类食物结构的直接信息，$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 分析法的结合可以获得更客观的结论，对古环境的复原具有重要意义。但同时，同位素分析法系实

① 张雪莲等：《古人类食物结构研究》，《考古》2003 年第 2 期；张雪莲：《应用古人骨的元素、同位素分析研究其食物结构》，《人类学学报》第 22 卷第 1 期，2003 年 2 月。

验所得，受各种条件的制约，而生物体内的$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$受环境影响较大，^{13}C的比率差值由多方面因素形成而又不易区分。所以，在使用时要多方收集资料，加强背景资料的分析和不同环境下$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$值的分析。

二、微量元素锶、钡与钙的分析①

研究者发现，人骨的微量元素可以作为人类食物结构的反映指标，目前可以使用的指标是微量元素锶(Sr)和钡(Ba)。

锶和钡这两种元素均为第二主族的碱土金属元素，化学性质上有些共性。锶、钡主要存在于人体骨骼无机物羟磷灰石中。

研究表明，在生物体内消化吸收过程中，会发生因锶和钡的吸收逐渐降低而产生钙的纯化过程，即生物纯化现象。当食物被吸收时，食物中的钙得到吸收，而对锶的吸收就差得多，钡的吸收明显就更差；这是由于在消化道中钙首先被吸收，影响了锶和钡的吸收。这样，随着食物链营养级的升高，Sr/Ca以及Ba/Ca的值就会越来越小。因此，通过对动物骨中Sr/Ca、Ba/Ca值的分析，就可了解动物在食物链中所处的营养级级别，甚至可以由此判断人们所处的社会地位高低。

研究发现，海相和陆相环境微量元素的含量差别一般来说比较大。海洋中钡与锶相对来说贫化，这是由于海水中硫酸盐的含量较高，而钡与硫酸根结合生成硫酸钡作为固体沉降下来，最终使海水中的钡的含量减低。这样，Ba/Sr的比值就可用来指示海生食物的存在。一般说来，陆生环境的Ba/Sr比值接近1，而海水中的$Ba/Sr < 0.001$，即海生物的Ba/Sr值远小于陆生物。由于生物体骨骼与食物中Sr、Ba的特定关系，就可利用Ba/Sr值推断所食海生物的比例，进而通过分析人骨微量元素含量的差别，就可以区分海相和陆相环境中的人群。Cheryl Gilbert等对位于好望角的天然食物网中109种可食用的植物和动物作了微量元素的分析，探讨了海洋植物与陆相植物间的差别、海洋动物与陆相动物的差别；由陆相植物到食草类动物，再到食肉类动物间的变化；由海洋植物到低级动物，再到高级动物的变化。另外，陆相环境中的锶的含量之所以不同，Toots等认为这可能与该地区地下

① 该部分主要参考张雪莲：《应用古人骨的元素、同位素分析研究其食物结构》，《人类学学报》2003年第22卷第1期。

地质层的不同有关，而埋藏过的人骨还可能与埋藏环境中土壤微量元素的组成有关。

此外，叶类植物中 Sr/Ca 的比例也是不同的，同一种植物在不同的环境中其值是有差别的，如在泥土和在营养液中的值不相同；叶类植物的不同部分其值也不相同，一般根茎部分的 Sr/Ca 值比新芽、嫩叶等部分的值高许多，而后者又与其生长介质中的值相近。一些谷类植物（如大麦、小麦等）的 Sr/Ca 值也有类似现象，不同的植物在同一环境中其比值是有差别的，即不同的植物对于环境中微量元素的摄入量不同；而同一植物的不同部分的 Sr/Ca 比值也不同，如 Bartlett 和 Gunn 检测到谷类植物的麸糠和胚胎的 Sr/Ca 值是其胚乳比值的 2 倍。由此，他们认为面粉中的 Sr/Ca 的比值应与加工提取的比例有些关系。因而人骨中 Sr 的水平在某种程度上可以反映出人群的等级身份，因为等级低的人群食用的谷类产品中所含的麸糠可能会多一些。

由上可以看出，微量元素分析在特征区域的区分上是一有力的武器，它能给出比较确凿的证据。但在区域特征不是特别明显的地方，还应同其他方法进行参照。还有，植物的种类不同、环境不同都会使其比值不同，这给背景资料的把握带来了难度，所以应用微量元素方法作为研究工具进行研究时还应对具体环境作具体分析。

胡耀武对河南贾湖遗址做了微量元素分析①。由于贾湖遗址出土了大量的稻壳和炭化稻，而稻米是一种低 Ca 植物，故采用 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 分析（因为其值的降低，除在食物肉类的成分增加以外，还有可能是食物中稻米比例的增加）。样品的聚类结果（图 12.14）显示，样品大致可分为三类。第一类由样品 380、282、394、341、319、381、335 和 318 组成，具有最高的 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值，这部分先民的食物中稻米的含量可能较低，而一些其他富含 Ca 的植物可能占一定分量，暗示采集野生植物也是其谋食方式之一。第二类是以样品 303、253、277、344、210、109、205、263、233 和 249 为代表，具有较高的 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值，这类先民的稻米或肉类的比例开始增加。第三类是样品 208，具有最低的 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值，表明这位先民食物中稻米或肉食的比例最大。

① 胡耀武：《古代人类食谱及其相关问题》，中国科学技术大学博士学位论文，2002 年。

在此基础上,经过对未污染样品做了 log(Sr/Ca)和 log(Ba/Ca)的盒氏图分析(图12.15),两个比值变化趋势相似,起初有较高的值,随后慢慢增加,至第四、第五段达到高峰,接着慢慢减小。这反映了9段时间内贾湖先民食物的变化。第一段,他们可能以狩猎或捕鱼为生,采集业所占比例较小。随着时间的推移,采集为主的食物比例逐渐增加,至第四、第五段达到高峰。随后,人们开始了驯化野生稻并开始大面积的种植。同时,也可能开始猪的驯养,为人类提供较稳定的肉食来源。

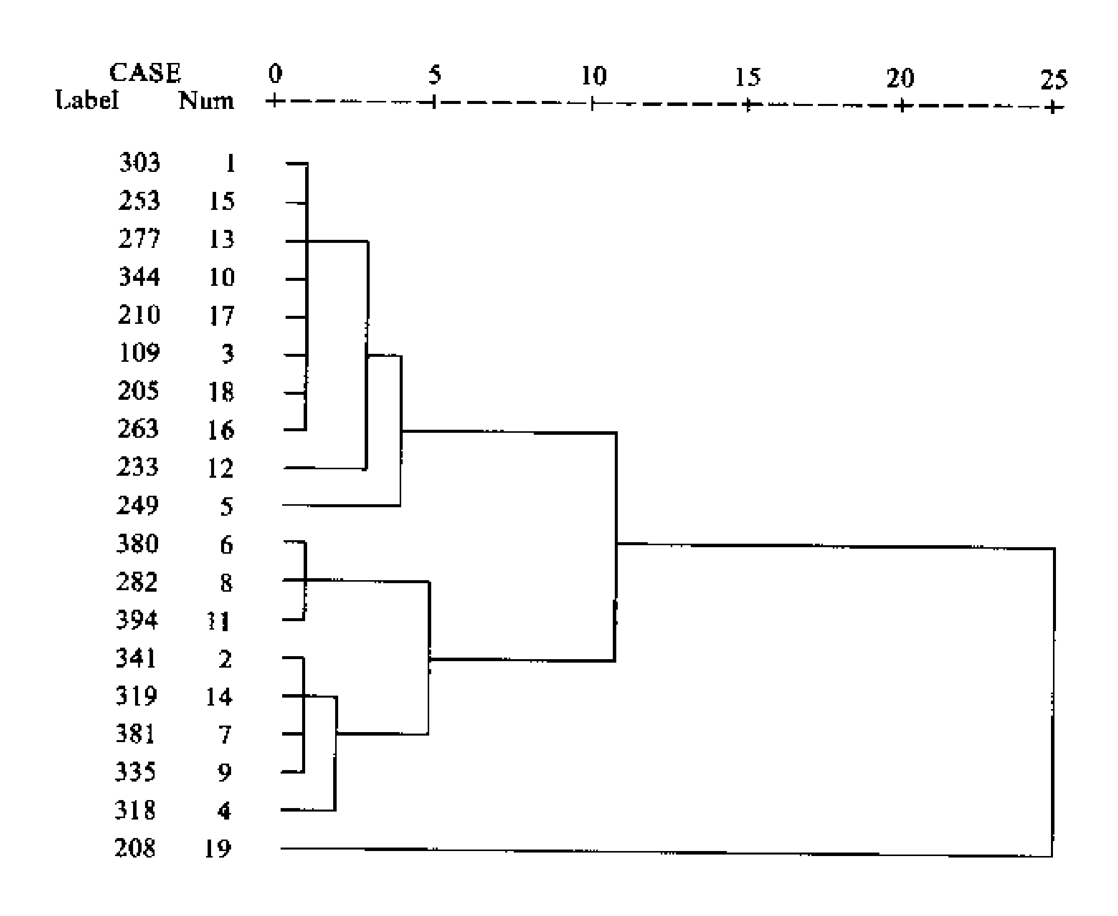


图12.14 舞阳贾湖遗址样品的聚类分析

采自胡耀武:《古代人类食谱及其相关问题》,中国科学技术大学博士学位论文,2002年。

研究表明，处在同一生态环境中的土壤、植物和动物之间，各自的 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值间存在线性关系。而即使是同一种生物，由于所处的生态环境不同，log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值也会有较大的不同。即不同地区，存在不同的线性关系。据此，可以从微量元素角度出发探讨人类的迁徙活动。图 12.16 是贾湖遗址的样品 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值图，除样品 249 外，未受污染样品的 log(Sr/Ca) 和 log(Ba/Ca) 值存在明显的线性关系，反映了他们生活在同一生态环境下，是贾湖当地的居民。尽管他们分属于不同时段的贾湖人，但线性关系显示贾湖遗址在 1 200 年的时间里生态环境没有太大变化。样品 249 可能是来自另外一个生态环境的移民。

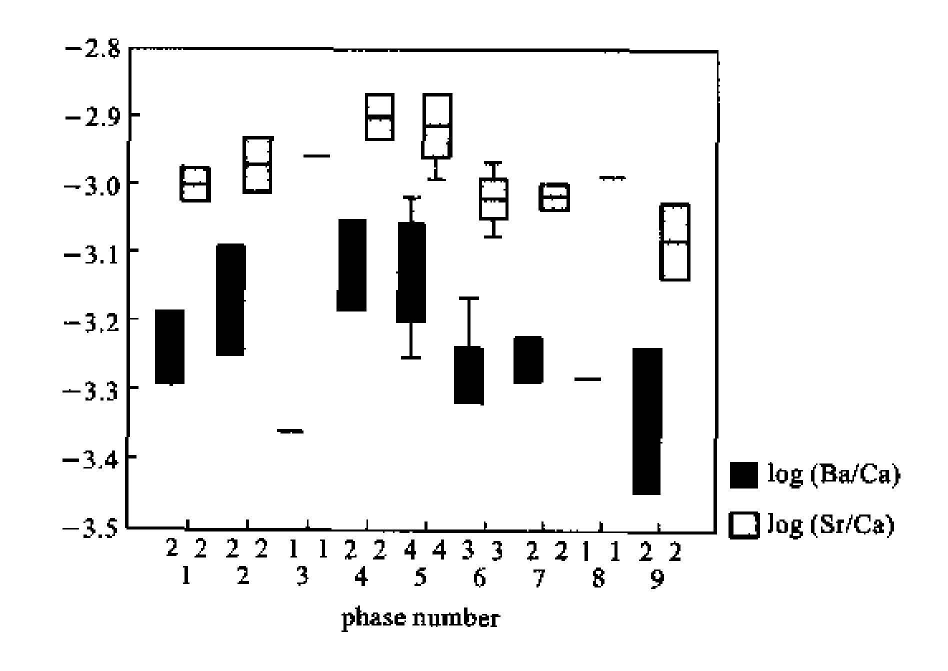


图 12.15　舞阳贾湖遗址样品 log(Ba/Ca) 和 log(Sr/Ca) 随文化段的变化
采自胡耀武：《古代人类食谱及其相关问题》，中国科学技术大学博士学位论文，2002 年。

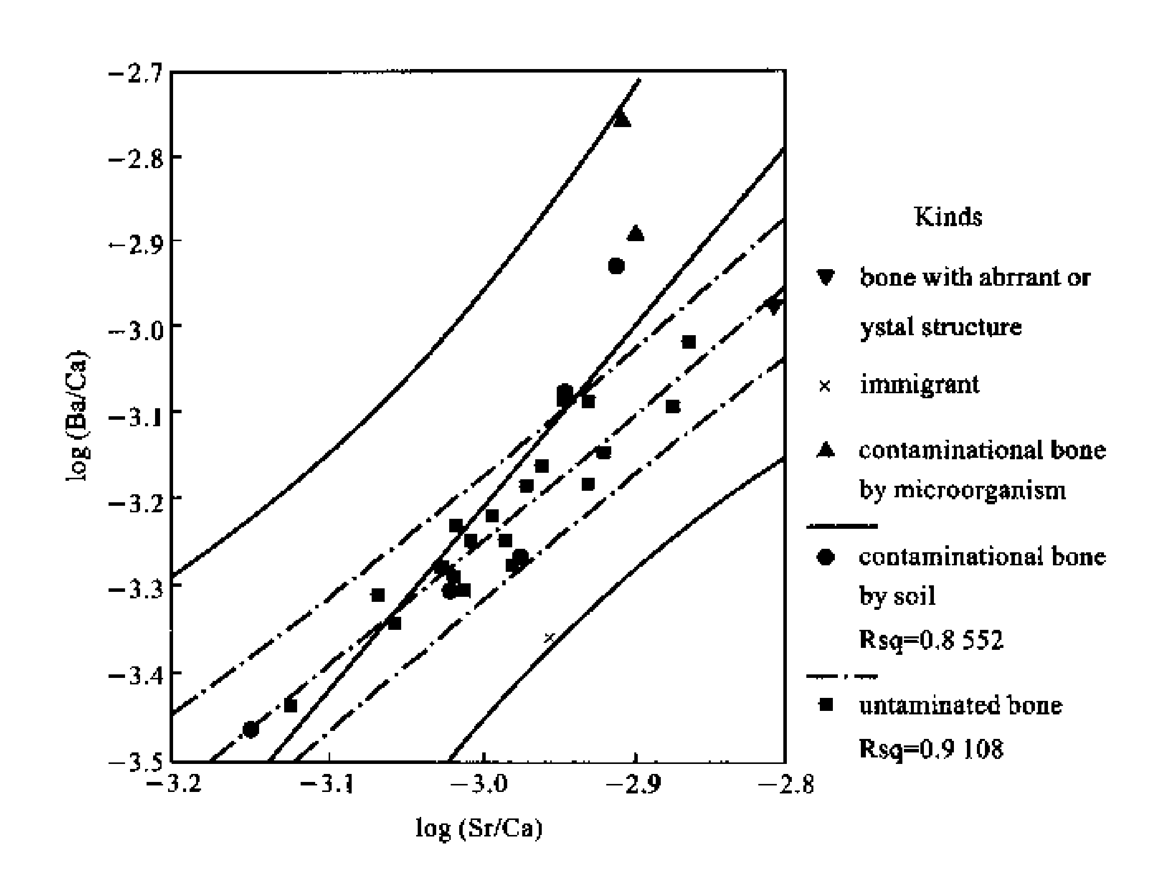


图 12.16 舞阳贾湖遗址所有样品的 log(Sr/Ca)和 log(Ba/Ca)图
采自胡耀武:《古代人类食谱及其相关问题》,中国科学技术大学博士学位论文,2002 年。

三、同位素锶、铅的分析①

锶和铅同位素的分析原理是相同的。但由于铅同位素的指纹特征不如锶同位素明显,在古人类食物结构研究中应用较少,所以这里仅对后者做一介绍。

自然界中锶同位素共有四种。^{88}Sr、^{87}Sr、^{86}Sr、^{84}Sr。其中^{87}Sr是由^{87}Rb衰变而来,即$^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr + \beta^- - \upsilon + Q$。它们主要分布于矿物、岩石中。一般表征指标为$^{87}Sr/^{86}Sr$。由于不同的地质构成特征形成了不同的锶的分布区域,这成为人们来追

① 该部分主要参考张雪莲:《应用古人骨的元素、同位素分析研究其食物结构》,《人类学学报》2003 年第 22 卷第 1 期。

溯其来源产地的依据。因为无论是在与人类日常生活密切相关的饮用水的地下水源中，还是与周围环境协调一致的食物链中，这种区域性的指纹特征很难发生改变。所以，长时期生活在一个地区的人们，其体内的锶同位素比值就具备其相应的一致性。对于古人类来说，一般在人类遗存易于保存的牙齿、骨骼中这种指标都可以找到。但当人类从一个地方迁移到另一个地方后，随着地质条件的不同使这种指标发生改变，人体内的锶同位素比值相应也要发生变化。

近年来的研究发现，人体头发、皮肤、骨骼等不同组织中锶同位素指标由于迁徙所带来的变化速率有着很大的差异，也就是说，显示当地地质特征的锶同位素指标被置换的时间周期有明显不同，从几年到十几年，甚至几十年。但人类的牙齿，却有着保持几乎一成不变的本质特征，且很少受到污染。人的牙齿是在青少年时期长成的，所以选择牙齿做人类青少年期生存（居住）地的研究是获得可靠信息的必备材料。同时，由于不同的人体组织具有不同的锶同位素置换周期，由此也可通过这些组织的同位素指标的比较来探讨人类迁移的整体信息。如 Jurian Hoogewerff 和 Wolfgang Papesch 等曾通过这种方法研究了距今 5 000 多年的木乃伊"冰人"不同部位骨骼中的锶同位素比值，从而获悉了木乃伊"冰人"的迁徙状况。

通过锶同位素的地区特征追溯人类的栖息地，由此可获取与当地环境相一致的人类食物结构状况，这是人类食物结构研究中一条比较重要的途径，同时与同位素^{13}C、^{15}N 等分析结果相互参照，互相补充。总之，锶同位素指标用于考古学研究正在逐步发挥其作用。

四、脂肪酸分析法及其应用

脂肪酸分析法在 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始使用，至今已有许多资料和经验，尤其在日本经过十几年的努力，已存入动植物数据 1 万种，考古数据5 000 种。

生物的主要构成成分是蛋白质、碳水化合物和脂肪，这些成分因周围环境如压力、水分包括土壤微生物的作用容易发生分解。1977 年，德国学者发现脂肪虽然很微量，即使是极微小的脂肪颗粒，都以很稳定的形成存在着，经过几千年、几万年也不会变质；原因是经过一段时间后，脂肪的表面会氧化形成坚膜而使内部的脂肪长期保存下来。古代的陶瓷器、青铜器、石器等器物表面有微小的孔隙使脂肪可以附着在其中。脂肪有很多种类，考古资料中残存最多的是脂肪酸。所有的生物体

内部都存有脂肪酸，但构成这些脂肪酸以及固醇的成分因动植物种类的差异而不同。脂肪酸碳素链条可分饱和型和不饱和型两种，饱和型脂肪酸分子呈棒状排列，一般构成兽类脂肪，易成固状物；不饱和型脂肪酸分子链是曲折的方状，一般包含在植物油和兽油中，多呈液体。固醇也因生物种类不同而有差异，动物的胆固醇含量较高，植物的谷甾醇含量多，微生物中麦角甾醇的含量较高。① 基于此，人们可以像鉴定指纹那样，将各种生物特有的脂肪酸与考古资料发现的脂肪酸作比较，来区分是大麦、小麦、稻米、菜籽、大豆，还是牛、猪、羊、鱼等生物体。这就是脂肪酸分析法，又称残存脂肪酸分析法②。

脂肪分析法的操作比较方便，有以下几个步骤：

（1）分析材料的获得。在采取材料时，要十分注意防止人手上的脂肪、现存动植物的脂肪和化学物质的污染，严禁手的接触和塑料、尼龙等化学制品、报纸、棉花等材料的使用。采集墓穴中的土壤时，要用充分洗净的铲子采集放入同样充分洗净的玻璃瓶中，并充入惰性气体；或者用锡箔包入土壤，排除空气后冷冻保存。对陶器、石器、兽骨等材料采取时，也一定要采集周围的土壤。凡直接接触化学制品、纸张、棉布等包装的样品都不能用。此外，所收集的土壤样品必须是在遗迹的一定区域（至少5个不同的区域）采集的。

（2）提取脂肪酸。在玻璃容器中放入分析材料和用水、三氯甲烷和甲醇混合而成的溶剂，使用超声波发生器进行提取，如果有脂肪的话，就会溶解在溶剂内。经过滤后再加入三氯甲烷分离，糖脂肪的一部分会溶解在水里，其他脂肪酸则溶解在下层的三氯甲烷中。将含有脂肪酸的溶液用硅酸薄层分离法剔除诱导脂肪和单纯脂肪等，然后用酸甲醇分解脂肪提取脂肪酸。此时再一次用硅酸薄层分离法将脂肪酸和固醇分离。

（3）测定脂肪酸。用气体分离法质量分析仪测定脂肪酸的分子量。脂肪酸在加热后会气化，使其通过含有不挥发性液体的玻璃管，各种各样的脂肪酸将会分离，使用高分解能力的质量分析仪测定其分子量就可以确定脂肪酸的种类。

（4）物种的确定。首先将现存动植物的脂肪酸组成的数据输入电脑，再将考

① ［日］中野益男：《根据残存脂肪复原古代社会》，《现代自然科学技术在考古学中的应用》，西北大学出版社1992年版，第72—73页。

② 赵力华：《脂肪酸分析法与树木年轮年代测定法》，《文物》1999年第3期。

古资料中的脂肪酸分析数据也输入电脑，由电脑进行相互比较，数据相近者可以认为是相同物种。

在实际操作中，还有一些需要注意的问题：

(1) 脂肪酸对于温度十分敏感。实验表明，脂肪酸经过加热会分解特别是超过300℃以后，其组成会发生很大的变化。因此，对炊具、火葬墓等加热过的考古资料进行分析时，必须考虑温度变化对脂肪酸组成的影响。

(2) 如果只查出一种脂肪酸，生物的确定比较容易。但是像炊具那样曾经调理过多数的食物的器物，可能附着有多种脂肪酸，在这种场合，首先找出与分析材料数据最接近的物种，然后使用电脑计算混合的比较。

从遗址或陶器、石器、石制品、骨角器甚至粪便化石里都可提取脂肪酸并进行测定，分析当时其中包含有哪种动植物，进而推断遗址各部位或各种遗物的用途，了解古人的饮食特点。日本学者对贝冢遗址出土的类别甚至可以区分男女性别、人畜之别，是否拉痢疾等营养健康方面的信息。日本带广畜产大学的中野益男对日本平城宫出土的照明器皿进行分析①，从灯芯处采集的脂肪酸中发现有棕榈酸、油酸亚油酸、埃尔卡酸，这是一种连接着22个碳素的保持一个两重结合的酸，在现存生物中只有菜籽具有这种脂肪酸，而且检测出的是植物所特有的谷甾酸。据此可以推断当时的灯油是菜籽油。同时还有一些照明器也使用过其他动物油和鱼油。中野益男还对山形县绳纹时代前期(距今约5 000年前)的押山遗址出土的甜饼进行了分析。因小甜饼未被破坏，对其进行分析后发现这块小甜饼营养丰富，推测当时是把栗子、核桃等砸碎后取出果仁，再加上日本鹿的肉和血液、骨髓，并掺入野鸟蛋加工而成。有意思的是，小甜饼的X射线分析显示它包含各种金属如锌、铁、铜、硫，无机物成分也丰富，食盐、酵母醇系人工加进。这个小甜饼为后人展示了一份多么生动的食谱。

脂肪酸分析法目前还存在着一些问题和难点。首先是现存物种的数据难以收集全，那些已消失的物种更难以收集，但没有这些数据就不可能进行对比；第二，许多影像因素目前无法消除。温度和环境的变化对脂肪酸变质有影响，炊具等调理过许多材料，有时单靠脂肪酸和固醇的分析还难以区分物种，土壤中混入绿肥、鱼

① [日]中野益男：《根据残存脂肪复原古代社会》，《现代自然科学技术在考古学中的应用》，西北大学出版社1992年版，第72—73页。

骨粉等肥料和其他动植物遗体的脂肪时，难以区分物种。为了解决这些问题，最近日本在使用脂肪酸分析法的同时，与DNA分析法、免疫学的氧抗体法等并用，进行综合分析。这些方法将会大大提高我们对古代人衣食住行的认识。

五、关于古代人类食谱的其他研究方法和成果

微量元素分析也是研究古代人类食谱的一个手段。该方法始于20世纪70年代末期，目前已有相当多的研究。研究表明，动物在吸收植物时，会发生生物纯化（Biopurification）现象，主要是Sr、Ba元素。动物对Sr、Ba的吸收远较对Ca的吸收少，由此导致骨中Sr/Ca、Ba/Ca显著降低。例如，食草动物骨中积淀的Sr/Ca约为原食物的1/5，食肉动物骨中积淀的Sr/Ca是食草动物的1/5。所以，分析古人类骨中的Sr/Ca、Ba/Ca，就可知道样品是以植物类食物为主还是以肉类食物为主。

植物的化合物，除了蛋白质、脂肪酸外，还有DNA，所以还可以通过对植物DNA的测定获取一些信息。

运用DNA分析食性目前还不是很普遍，国外做过一些工作。德国一些科学家采用不同方法从陶器内有机残留物中提取古代DNA，对其中的植物叶绿体rbcL基因运用PCR方法扩增，再将DNA测序结果与标准序列作比照分析，居然判断出它的种属是一种类似爬山虎的攀缘植物，广泛分布于洪都拉斯到巴西一带，其果实可以提炼出一种用作眼膏的药剂，据说印第安人至今仍在使用这种药剂。这些科学家还对一个所谓的香肠（Sausage End）做了分析。据说这是一种史前先民用兽皮作的容器支脚。经DNA测序分析，与有关基因库作对照检索后，判断为鼠尾草属植物，且更接近于野生的鼠尾草，由此推测当时人们可以采集这种植物为食。

食性分析的方法很多，除上面两种外，还有氧、锶等同位素分析、^{13}C核磁共振谱等，其他方法处于零星使用或研究阶段。食性的分析，大多基于这样一个假设，即研究的骨骼在漫长的时间内生物的物化性质保持不变。实际的研究表明，骨骼的性质会发生一些变化，所以在应用这些方法时要谨慎。提取样品时，尽量选择污染小、骨骼物化性质变化不大的，同时要进行样品污染检验。分析处理时，要充分考虑外来的影响因素，与其他方法结合使用。

六、寄生虫所反映的食性

家畜中常常会有寄生虫，如马蛲虫以马为宿主，犬毒蛔虫以狗为宿主，所以，粪

土中的寄生虫可以证明某种家畜的存在。例如，一个公元 80～90 年的罗马帝国堡垒中发现了马蛲虫，说明这里曾有马。而人体也常常成为人类肠道寄生虫（如蛲虫、钩虫）的寄居之处，如果某遗址中的粪土发现大量蛲虫，说明该地居住拥挤，公共卫生状况差，有寄生虫传染病。

此外，人类吃过某种动物后，这种动物内的寄生虫会通过人的粪便排出，所以考古遗址中的寄生虫直接反映人类的食谱。莱因哈德和巴纳姆对秘鲁沿海地区的出土干尸进行分析，结果表明在距今 10 000—4 000 年前，该地区人消费了大量的没有烹调熟透的鱼，致使以鱼为中间宿主的鱼绦虫引发的传染病裂头虫病流行。有意思的是，从事园艺的居民的干尸表明，因他们不食鱼类，而吃块根、水果，没有这种传染病。专家们在美国西南部的统计结果表明，农业民族中寄生现象明显高于渔猎采集部落；而且以人类本身为宿主的寄生虫在农业民族中普遍存在，而以动物为宿主的寄生虫则在渔猎采集部落占主导地位。

思考题

1. 什么是生业考古？
2. 采集动物骨骼需要注意哪些问题？略举例说明。
3. 动物遗存鉴定分为哪几方面？并分别说明其作用？
4. 试述植物学考古的意义及植物学考古的手段。
5. 简述食性研究的意义及方法。
6. 自然因素对人类有哪些影响？

第十三章
古代人骨的研究

古代人骨的研究由来已久，特别是人类学的研究已取得许多成绩。通过辨别体质指数，得出死者的性别、死亡年龄、身材、长相等体质特征，进而探讨不同人体间的关系等问题。近年来，现代分子生物学的引入，促进了确定古生物体种属、群体间的遗传关系等问题的研究，为进一步探讨现代人类的起源等重大课题提供了科学依据。

第一节　人骨的形态学研究

人骨的形态研究主要依靠体质人类学的方法和研究成果。

体质人类学(Physical Anthropology)是将人类作为一个生物种，研究其体质形态、身体结构及其生物学的变异和进化，以阐述人类的起源、人种的形成和发展的规律的学科。考古发掘中出土的人体遗骸(包括古人类化石)是体质人类学的重要研究对象，对人类骨架的研究可为考古学提供古代人类及古代社会的许多知识。从某种意义上说，只有经过人类学鉴定的考古材料才是完整的[①]。我国著名的前辈考古学家李济先生说过："考古学家一定要有体质人类学的常识。"[②]体质人类

---

① 潘其风、韩康信：《体质人类学》，《中国大百科全书·考古学》，中国大百科全书出版社 1986 年版，第 524—526 页。

② 中国社会科学院考古研究所等：《安阳殷墟头骨研究》序言，文物出版社 1985 年版，第 2 页。

学在20世纪初就从西方传入我国，但其进展却十分缓慢，解放后的发展较快，近十几年来取得了一些成绩。

体质人类学最初依靠形态学去分析人种、性别，后来随着数理统计方法的引入，分析的结果更为严密，研究的内容也得以深入。

在此，先谈一下骨骼材料的收集（骨骼材料的整理因研究问题、角度不同而异）。骨骼的采集与遗物相比，要注意保护，以免损伤。清理时务必保持骨架的完整，尤其是面部。采集时，在绘图、记录完后，将每个个体的全部骨骼收集，包括脱落的牙齿（已朽的骨骼也要采集牙齿）。每个个体的头骨单独放置，且放置头骨时，需有填充物，以免压坏。采集人骨的同时，最好一起取其周围的少量土样。测量骨骼数据前，初步清理工作很重要，最好不要用水清洗，以免受污染；骨骼上粘有硬土时，用湿刷子刷洗局部，之后放在阴凉通风处晾干。特别重要的人骨，最好采取整体切块，并对人骨做化学方法的加固。

一、人骨的测量

人类学上骨骼的差异是比较明显的。例如，男女在青春期后因性激素的作用而发育出不同的骨骼形态，以骨盆的差异最为明显，其次是颅骨，再次是其他骨骼部分。不仅性别有别，种属和族属的区别也是极为显著的，从不同地区骨骼的族属、种属差异可以推测古代的文化交流和人类的迁徙行为。

形态学研究第一步先进行目察，是将出土的人骨同已知各种系族类骨骼的整个结构进行比较，直接分类。内容包括：

（1）根据头骨的形状（颅型、面型、眉弓、眶型、鼻型、颧骨、下颌、乳突、枕外隆突等）和骨盆（骨盆入口、坐骨大切迹、耻骨角、耳状关节面、骶骨等）判断性别（图13.1）。

（2）根据牙齿（乳齿、恒齿的萌出时间）和骨骺的愈合时间、骨缝的愈合时间、耻骨联合面，以及人骨、牙齿的组织学断龄。

（3）从头骨（颅型、面部、面型、眉弓、眶型、鼻型、颧骨、犬齿窝、腭型）区分人种。

第二步是用生物统计的方法进行头骨测量。作定量的比较，可通过测量的数值（如长、宽度）用指数进行计算，如殷墟西北岗头骨的分析时用吴定良先生设计的专用于测计中国人头骨脑量的数理公式、皮尔逊拟订的头骨长宽指数的变差

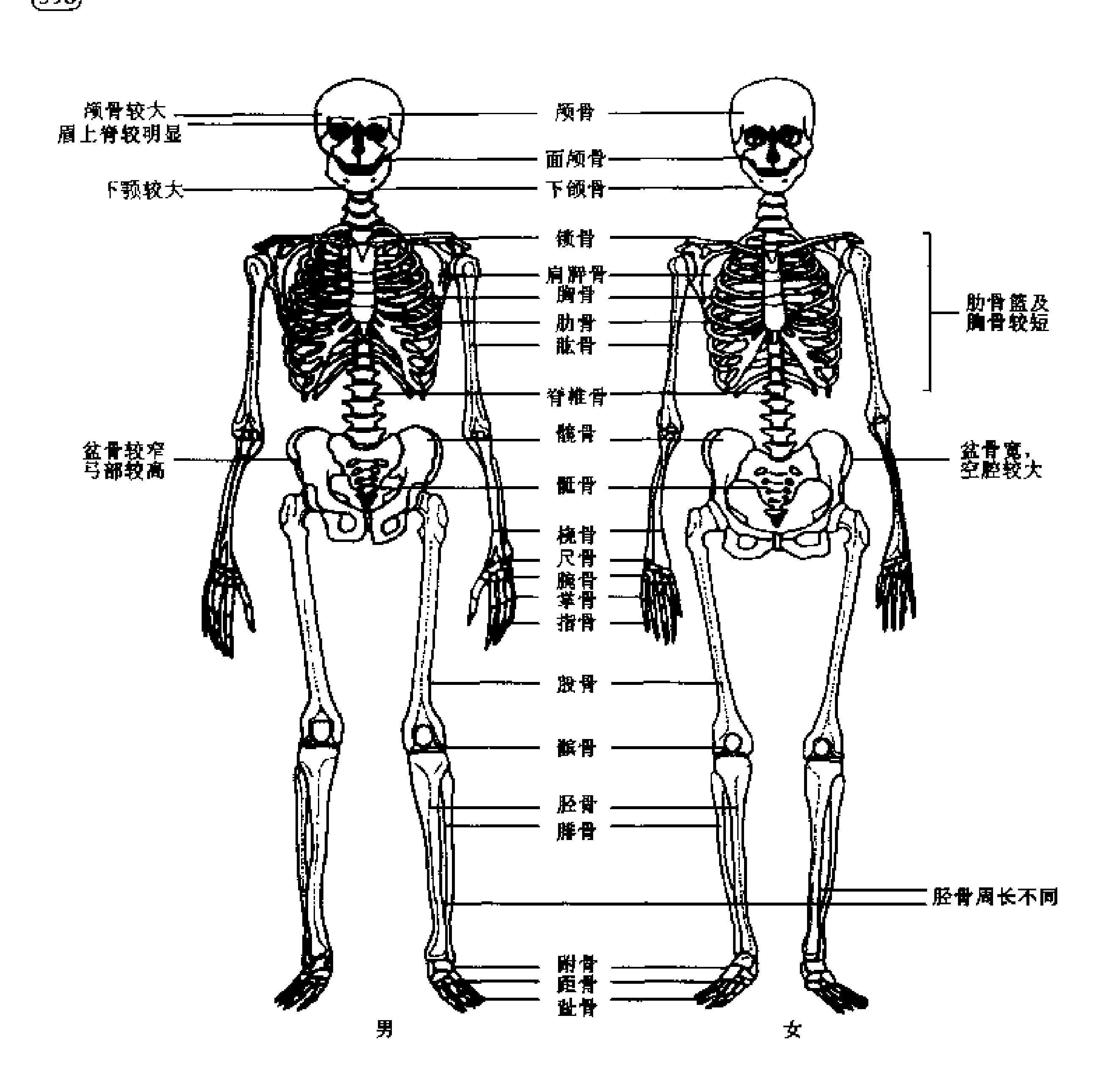


图13.1 男女的人体骨骼特征

度——平均标准差(MSD)是否大于2、6、8和豪厄尔斯拟订的头骨种系偏差标准。在测定两个或多个组群之间体质的亲疏关系时,传统的方法有种属亲缘系数

(CRL)值法、平均组差均方根值(计算公式为$\sqrt{\frac{\sum\frac{d^2}{\sigma^2}}{n}}$,$d$ 代表两个待测组的平均值组差,σ 为同种类标准差,n 是测定项目总数,计算结果越接近0,表明两个测试组关系接近)①。运用公式计算,实际上是定量分析法对定性分析法的检验。

最近引用现代统计学中的各种多元统计分析方法,取得了许多出乎意料的成果。聚类分析是比较常用的一种,它根据对象的定性定量特征将其分组归类,我国学者多用欧氏距离系数聚类法,计算公式是 $Dij=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m}(xiR-xjR)}{m}}$,其中,$i,j$ 代表颅骨组,R 代表项目,m 代表项目数,Dij 值越小,表明两组间的关系越密切。聚类法还有 Penrose's 形状距离聚类法。主成分分析是用1个或几个组合变量来代表多个变量,把较多变量的观测值缩减为较少的主成分,可以用散点图来表示,还可以用因子分析或Q型相关系数做主成分分析。三角多项式图是将一个多维数据化为平面上的一条曲线,这种曲线能够保留原始数据的全部信息,根据曲线的基本走向、峰谷的变化来进行不同的人群分类。

二、人类学的研究成果

体质人类学目前已对世界范围内的古代居民的种系分布有大致了解。以我国为例,旧石器时期的头骨化石表明,其形态均为形成中的蒙古人种,都保留有若干原始特征。华南、华北的智人在形态上已有明显差异,华北山顶洞人头骨形态和现代亚洲北部和极区蒙古人种、美洲人种相似,华南的柳江人骨在一般形态上和蒙古人种的南方类型有更多相似性。中国的智人在体质形态上与西方同类智人相似,但发展趋向不同。中石器时代遗存少,面貌不清。

我国体质人类学对新石器时期的人骨研究比较多,发现我国的旧、新石器时代人类体质上的承继关系明显。该时期的居民大体上类似同一地区的蒙古人种,但呈现出南北不同的多形态差异。关于这时蒙古人种发展进程中的地域性差异,学者们见仁见智,基本上用多元统计分析方法进行过研究,提出了各自的见解。张振

① 中国社会科学院考古研究所等:《安阳殷墟头骨研究》,文物出版社1985年版。

标等通过计算样本组间的欧氏距离系数对9组新石器时代颅骨进行了聚类分析后指出,中国新石器时代居民的体质特征可以划分为3个地区类型,即以昙石山、甑皮岩两组为代表的华南地区类型,以大汶口、野店、西夏侯、下王岗和宝鸡等5组为代表的中原地区类型和以半坡、华县两组为代表的关中地区类型①。陈德珍采用Penrose's形状距离聚类和Q型相关系数的主成分分析法研究后认为,我国新石器时代居民的体质特征可分为华南、华北两大类群,而华北类型又可再分为3个小类群:一是下王岗组、庙底沟组、野店组;二是石固组、大汶口组、西夏侯组;三是宝鸡组、华县半坡组、红山后组。在人类发展过程中,南北两群间和华北各类群间都发生过血缘混杂的过程②。潘其风认为存在三个种系分布区:分布在黄河流域的新石器时代居民,体质上总的与东亚蒙古人种接近,但中晚期上游和中下游的居民在体质上有一定差异;华南地区诸新石器文化居民的体质特征接近南亚蒙古人种,并兼有某些与赤道人种相对比的性状;北方地区存在两个种族群体,即西部扎赉诺尔人的后裔和东部极区蒙古人种类型③。朱泓用欧氏距离公式分别对黄河流域、南方地区的新石器时代居民体质进行了聚类分析,并提出体质类型的划分与文化的区系类型存在着重合现象,北方黄河流域的居民的体质特征分为黄河上游和黄河中下游两个类型,黄河中下游又分为黄河中游亚型和黄河下游亚型,黄河上游类型以马家窑文化系统和齐家文化系统的居民为代表,黄河中游亚型以仰韶文化和庙底沟二期文化居民为代表,黄河下游亚型以大汶口文化居民为代表。居住在我国秦岭—淮河一线以南的新石器时代居民分为三个类型:南方沿海地区类型,该类型以昙石山组、甑皮岩组、河宕组为代表,河姆渡组属此类型;峡江地区类型,以大溪组和七里河组为代表;黄河中下游类型,以下王岗组为代表④。孟庆福等人用四种多元分析法将中国新石器时代居民分为三大类型,黄河中下游类型、华南类型、黄河上游类型⑤。1984年韩康信、潘其风梳理当时的全部古人种学研究成果,建立了

① 张振标等:《中国新石器时代居民体质类型初探》,《古脊椎动物与古人类》1982年第1期。

② 陈德珍:《中国新石器时代居民体质类型及其继承关系》,《人类学学报》1986年第5卷第2期。

③ 潘其风:《中国古代居民种系分析初探》,《考古学文化论集》(一),文物出版社1987年版。

④ 朱泓:《黄河流域新石器时代居民体质特征的聚类分析》,《北方文物》1990年第4期;朱泓:《中国南方新石器时代居民体质类型的聚类分析》,《中国考古学会第七次年会论文集》,文物出版社1989年版。

⑤ 孟庆福等:《中国新古器时代居民体质特征的多元统计分析》,《社会科学战线》1992年第4期。

我国古代居民种族人类学类型的时空框架，发表了《古代中国人种成分研究》一文[①]。之后，朱泓将全国范围内的人骨分为古中原类型、古华北类型、古华南类型、古西北类型、古东北类型[②]。

1989年，吴新智发表了《论中国古人类的连续发展》一文，在系统总结出土资料结合颅骨形态学的基础上，提出了"中国古人类连续发展"的理论[③]。

最近，刘武、张银运运用颅骨测量数据统计分析了中国直立人形态特征的变异[④]。他们采用多变量统计分析方法对33件非洲和欧亚地区直立人的颅骨测量数据进行了分析，发现亚洲大陆的周口店和南京直立人与生活在东南亚群岛的印度尼西亚直立人具有不同的颅骨测量特征。中国标本以较窄的前额部和枕部，以及宽阔的颅骨中部为特点，而印度尼西亚标本的额部和枕部的宽度与颅骨中部的宽度相对较为接近。非洲直立人有相对宽阔的额部和枕部，这些颅骨测量特征的表现上与印度尼西亚直立人接近。统计还发现，中国的和县直立人的颅骨测量特征与周口店和南京直立人的明显不同，而接近印度尼西亚和非洲直立人。周口店直立人独有的测量特征似乎与时代和性别无关，也许同环境适应和遗传漂变（Genetic drift）共同作用的结果。

历史时期，安阳殷墟的发掘获得了大量的殷商人种学资料，殷墟一开始发掘，就非常注意人类骨骼的采集与研究，在一批学者如李济、杨希枚、许泽民、臧振华、韩康信、潘其风的共同努力下，殷墟人骨的研究成果显著，1985年出版的《安阳殷墟头骨研究》对解放前后历次发掘的殷墟人骨资料进行综合性的报道和研究[⑤]；西北岗祭祀坑、中小型墓的人骨表明殷商民族体质上是单元（蒙古人种）多类型，而非多元型，中小型墓为代表的自由民（殷代平民）体质与现代东亚蒙古人种接近，少数混有某些类似北亚特征的混合，而殷王室成员可能混合有某些北方蒙古人种

---

① 韩康信、潘其风：《古代中国人种成分研究》，《考古学报》1984年第2期。

② 朱泓：《建立具有自身特点的中国古人种学研究体系》，《我的学术思想》，吉林大学出版社1996年版。朱泓：《中国东北地区的古代种族》，《文物季刊》1998年第1期。

③ 吴新智：《论中国古人类的连续发展》，《中国原始文化论集——纪念尹达八十诞辰》，文物出版社1989年版。

④ 刘武、张银运：《中国直立人形态特征的变异——颅骨测量数据的统计分析》，《人类学学报》2005年第24卷第2期。

⑤ 中国社会科学院考古研究所等：《安阳殷墟头骨研究》，文物出版社1985年版。

的特点,西北岗的祭祀坑还包括其他人种,这些都是殷王室的异族战俘。朱泓用平均数组间差异均方根的方法对殷人和周人的体质类型进行比较①,殷人、周人的体质是同种类型,殷人主要包含蒙古人种的东亚、北亚两种类型的体质因素,周人则包括了蒙古人种的南亚、东亚类型,且南亚蒙古人种的因素略占优势,殷商两族的体质类型可能与两个族源、考古学文化有关。近十几年来许多学者对青铜时代不同地区的居民种系进行了研究,其中综合性的研究有朱泓对北方青铜时代居民体质的分析、韩康信对丝绸之路古代居民种族的研究、潘其风对内蒙古、东北地区商周至汉代居民的研究②。汉代人骨与现代东亚类蒙古人种的变异方向一致。朱泓还将先秦时期的南方种族分为三个种系类型:古华南类型、古中原类型和峡江地区类型,古华南类型可能代表了"古越人"的种系特征,峡江地区类型或许与巴人的起源有关③。

考古学中运用体质人类学的比较研究,除了对我国古代历史上的所有人种进行纵向研究外,还与现代人种类型或在更大范围内进行比较,目前的比较研究集中在同属一个种族下的比较。韩康信等人对我国大汶口文化为代表的拔牙、头骨枕部畸形、口颊含球等习俗与日本古代的拔牙习俗相比较,得出两地古代居民具有相近的沿海环境,相似的生理特点,但两者的系统演变关系缺乏④。韩康信等人还把中国山东临淄出土的周至汉代人骨与日本西部的弥生人、绳纹人的综合测量数据进行比较,表明蒙古人种东亚类群中的一支在历史时期曾经向东部沿海地区进行扩展⑤。

① 朱泓:《关于殷人与周人的体质类型比较》,《华夏考古》1989年第1期。

② 朱泓、孟庆福:《中国北方青铜时代居民体质特征的多元统计分析》,《博物馆研究》1993年第3期;韩康信:《丝绸之路古代居民种族人类学研究》,新疆人民出版社1993年版;潘其风:《内蒙古和东北地区商周时期至汉代居民的人种类型及其相互关系》,《中国考古学论丛》,科学出版社1995年版。

③ 朱泓:《中国南方地区的古代种族》,《吉林大学社会科学学报》2002年第3期。

④ 韩康信、中桥孝博:《中国和日本古代仪式拔牙的比较研究》,《考古学报》1998年第3期。

⑤ 中国社会科学院考古研究所考古科技实验研究中心:《考古研究所科技考古二十年》,《考古》1997年第8期。

第二节　分子生物技术分析和遗传因子

分子生物学技术在20世纪中后期得到迅速发展。1953年，Watson和Crick创立了生物遗传分子脱氧核糖核酸（Deoxyribonucleic Acid，DNA）的双螺旋结构，建立了生物遗传机因的分子机理，开创了生物学及生命科学的新时代。

分子生物技术在考古中应用得越来越广泛。例如，根据人的遗传基因原理可以从古代人类遗骸中提取DNA片断，进而复制、测序，分析样本的亲缘关系，这种方法可对墓葬内出土的人骨做个体鉴定、家系鉴定等，还可以比较群体内个体差异或相似程度，进一步比较不同人群的遗传因素，揭示其在进化上的相互关系，从而重绘人类的演化过程。最初，研究者是通过分子克隆的技术来分析古代DNA，但由于古代生物体在漫长的岁月里发生变质、降解会导致DNA受损，因此该技术的应用遇到很多困难。近年来，由于新技术、新方法（如PCR技术、STM与AFM图像、流动式单分子荧光检测法等）具有所需DNA含量少、高特异性、高敏感性的特点，使得古DNA数量极少、质量极差等干扰不再是分析研究时的障碍。与此同时，随着核酸序列研究的突破性发展，人们逐渐发现不同生物体核酸序列的相似性与其亲缘关系的疏密直接相关，且与生物体的形态和生理特征受环境影响很大不同，核酸序列受环境的影响较小，故而反映的信息更客观。

一、DNA的结构与特性

（一）DNA的结构

人类生命个体的最基本单元是细胞，人体有亿万个细胞，而细胞中最大的细胞器是细胞核，细胞核是遗传信息贮存、复制和表达的主要场所。细胞核主要成分包括脱氧核糖核酸（DNA）和少量的核糖核酸（RNA），DNA与核蛋白相结合并以染色体的形式存在。每个细胞含有23对染色体，其中22对常染色体（Autosome）和1对性染色体（Sex Chromosome）。存在于常染色体内的DNA称为常染色体DNA（Automal DNA），存在于性染色体内的DNA称为性染色体DNA（Sex-chromosome DNA）。染色体中的遗传物质是DNA（图13.2）。

DNA就是Deoxyribonucleic Acid的缩写，其实质就是脱氧核糖核酸。它是由

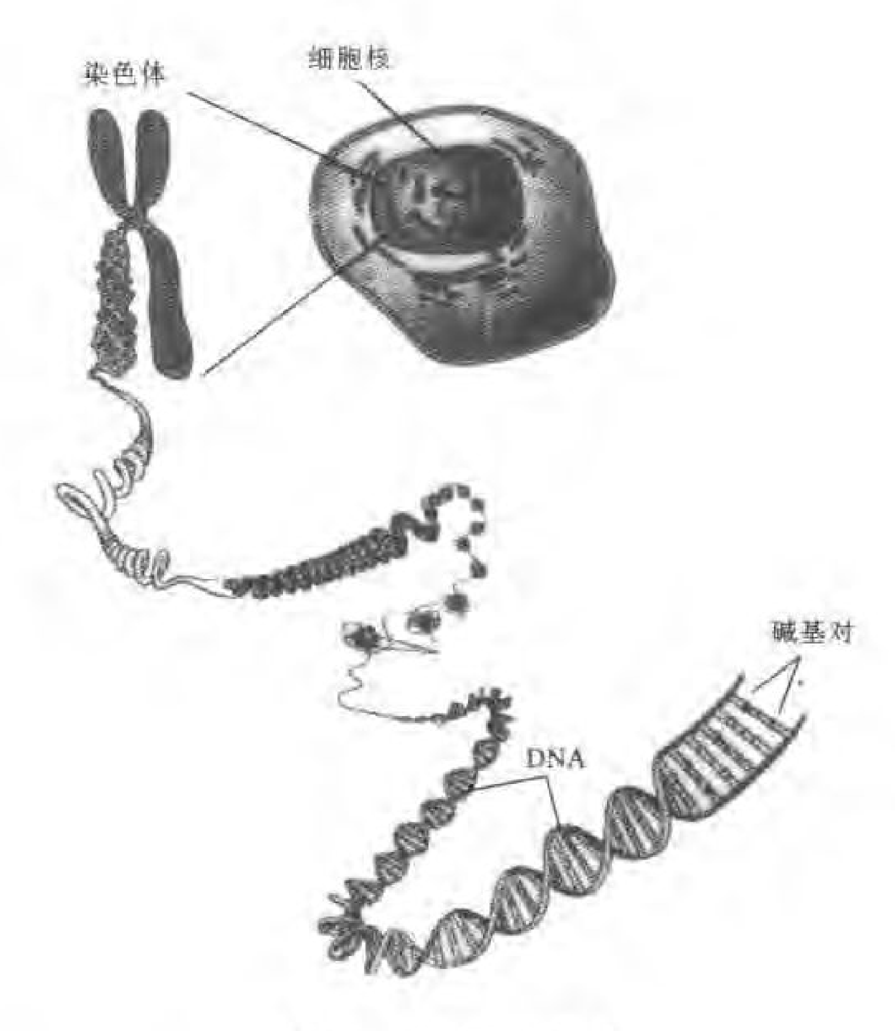


图 13.2 DNA 结构示意图

很多单核苷酸按序列规则聚合形成的多聚核苷酸。

核苷酸(Nucleotide)是多核苷酸链的结构单位。采用不同的降解法,可以将多核酸链降解成核苷酸。核苷酸又可分解成核苷(Nucleoside)和磷酸。核苷再进一步分解,就生成戊糖和碱基(Base)。根据核酸中所含戊糖种类的不同而分为核糖核酸(Ribonucleic Acid, RNA)与脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid, DNA)。

每个 DNA 的分子都是由两条互相缠绕的多核苷酸长链组成。多核苷酸链是由核苷酸通过 3',5' - 磷酸二酯键连接而成的线型大分子。在多核苷酸链中,磷酸和脱氧核糖交替相连,构成了分子的骨架,而碱基为侧链。在不同的多核苷酸链

中，其骨架是相同的，区别只是碱基的种类和排列顺序(图 13.3)。

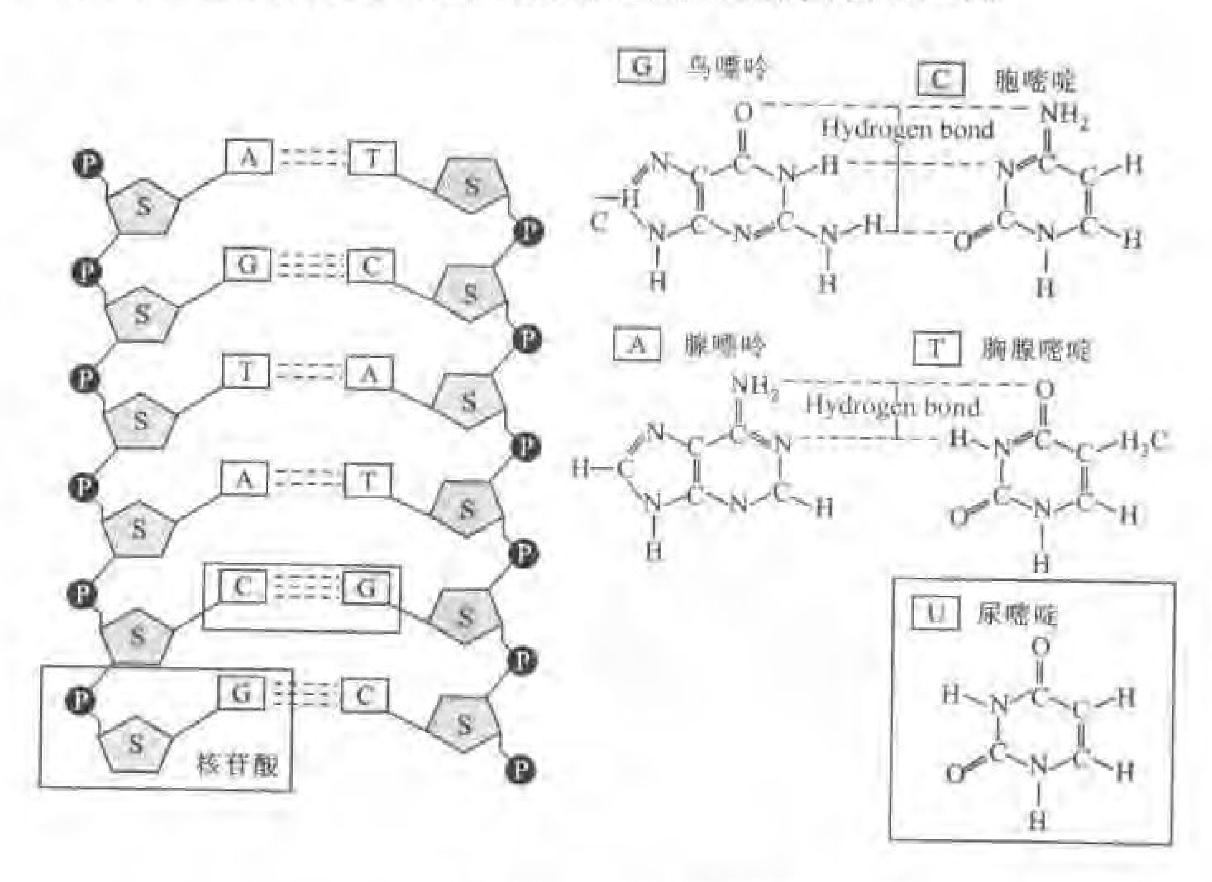


图 13.3　DNA 的化学结构图

DNA 的一级结构是指其中的核苷酸的排列顺序，称为核苷酸序列；由于四种核苷酸间的差异主要是碱基不同，因此也称碱基序列。

DNA 是由两条反向平行的多核苷酸链组成的，分子的主链位于螺旋的外侧，碱基则位于螺旋的内部，两条多核苷酸链通过碱基间的氢键相结合①。这就是右旋的双螺体 DNA 二级结构(图 13.4)。DNA 的双螺旋结构(Double Helix)对遗传物质的稳定性和准确性至关重要。在双螺旋中，由于形成氢键的基团在空间取向的限制，以及为了所形成碱基对的大小能容纳于双螺旋中，碱基的配对关系是严格的，一条链上的嘌呤碱必须与另一条链上的嘧啶碱相匹配。其中，腺嘌呤只能与胸

① 阎隆飞、张玉麟主编：《分子生物学》，中国农业大学出版社 1997 年版。

腺嘧啶配对，之间形成两个氢键。鸟嘌呤只能与胞嘧啶配对，形成三个氢键，所以G－C碱基对间的连接较为稳定。碱基间的这种配对原则称为碱基互补（Base Complementary），这种配对关系称为Watson－Crick配对。这一原则预示着DNA分子中的碱基A与T、G与C以互补方式存在的可能性。根据这种碱基互补原则，当一条多核苷酸链的碱基序列被确定后，就可推知另一条互补链的序列。碱基互补原则有着极其重要的生物学意义，DNA复制、转录、反转录等过程的分子基础都是碱基互补①。

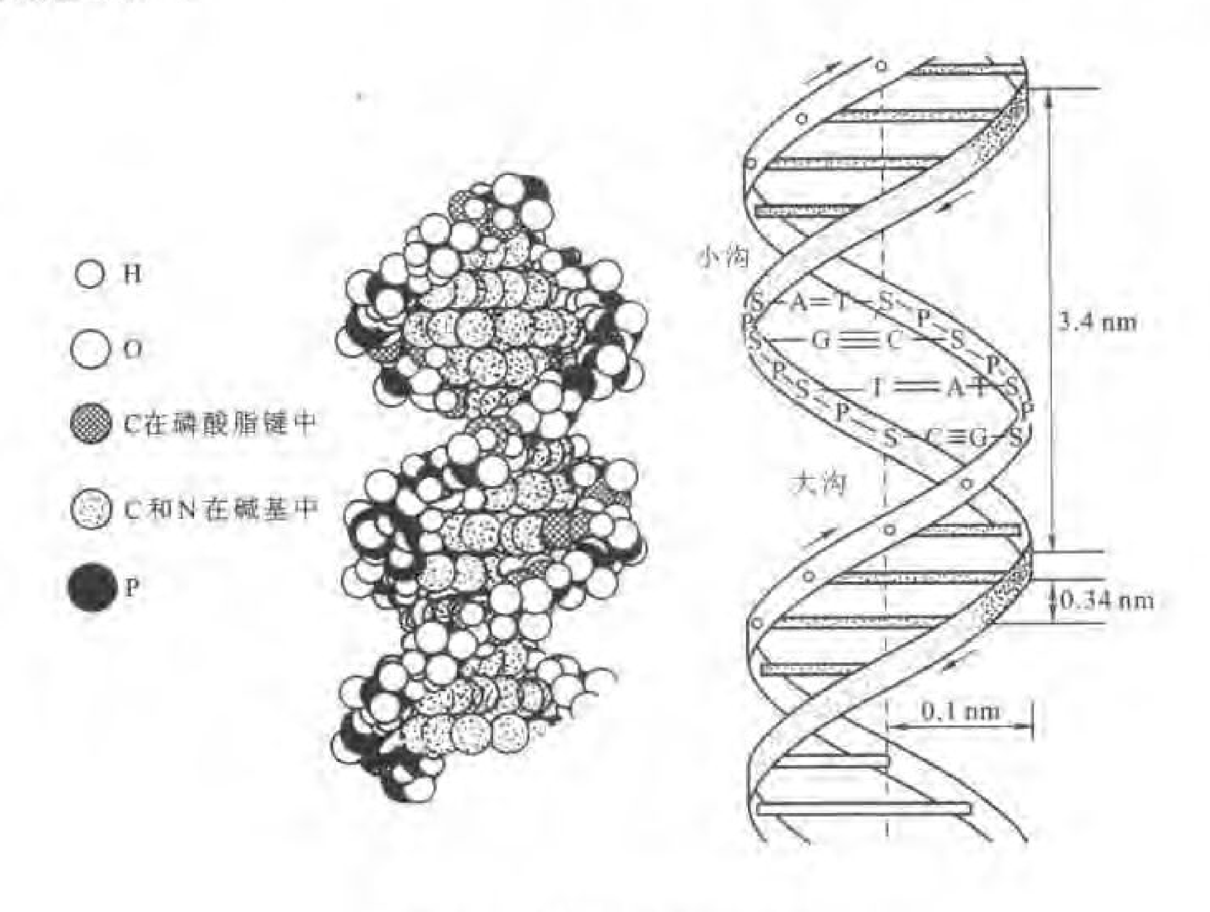


图13.4 DNA的双螺旋结构图

① 阎隆飞、张玉麟主编：《分子生物学》，中国农业大学出版社1997年版；沈同、王镜岩主编：《生物化学》（下册），高等教育出版社1999年版。

DNA 双螺旋进一步扭曲盘绕形成其三级结构，超螺旋就是三级结构的主要形式。DNA 双螺旋链与组蛋白结合成核小体，核小体是 DNA 紧缩的第一个阶段，在此基础上，DNA 链进一步折叠成每圈 6 个核小体，直径为 30 纳米的纤维状结构，这种 30 纳米纤维再扭曲成襻，许多襻环绕染色体骨架形成棒状的染色体，最终压缩近 1 万倍，使每个染色体中 DNA 分子容纳在细胞核中（图 13.5）。

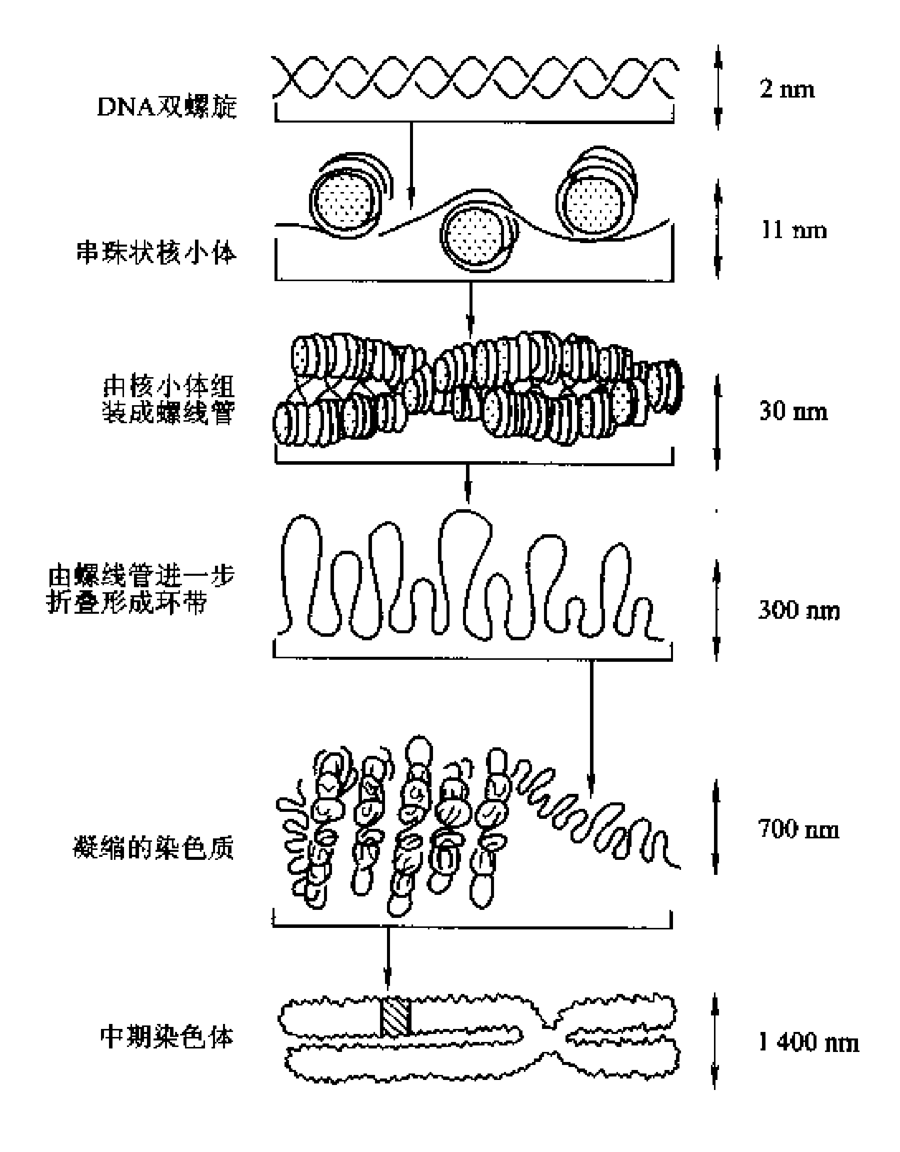


图 13.5　染色体构建的多级模型

（二）DNA 的复制与进化

DNA 是遗传信息的载体。生物机体的遗传信息以密码的形式记载在 DNA 分子上，表现为特定的核苷酸排列顺序，并通过 DNA 的复制（Replication）由亲代传递给子代。复制是指遗传物质的传代，以母链为模板合成子链 DNA 的过程。碱基配对规律和 DNA 双螺旋结构是复制的分子基础，其化学本质是酶促的生物细胞内单核苷酸聚合。

当细胞繁殖下一代时，DNA 必须专一性地复制，才能使子细胞含有相同的遗传信息，从而保持物种的稳定。在生物的生长发育过程当中，记载于 DNA 上的遗传信息转录（Transcription）给 RNA，然后经过翻译（Translation）生成特定的蛋白质，以执行各种生命功能，从而使后代表现出与亲代相似的遗传性状。具体而言，当细胞分裂时，DNA 分子伸直，碱基对间的氢键断裂，母细胞根据碱基规律由一条母链准确复制一条子链，形成各由一条母链和一条子链组成的两个子细胞，遗传信息存在于每条 DNA 链的碱基序列中①。由于碱基在 DNA 长链中可以任何顺序排列，致使 DNA 链中的碱基数目众多，这构成 DNA 分子的多样性；同时，每个 DNA 分子具有特定的碱基排列顺序又构成了 DNA 分子的特异性。也就是说，当细胞分裂时，DNA 准确自我复制，亲代细胞所含的遗传信息就完全传送到子代细胞中。

研究表明，DNA 是细胞中唯一能自我复制的遗传物质，所以 DNA 的复制是一个高保真的过程，生成的子代 DNA 与亲代 DNA 保持着高度一致性。尽管如此，在复制过程中总难免发生一些错误，结果它们就将遗传下去。DNA 的这种永久性的改变称为突变，其中的基因突变是物种进化的基础。

DNA 的进化方式有 4 种类型：替换（Substitution）、缺失（Deletion）、插入（Insertion）和倒位（Inversion）。替换一般以一个碱基为单位，故也称碱基替换。当一个个体发生的碱基替换或其他类型的突变经许多世代后在群体内扩散并最终固定下来时，为基因替换，由突变形成的新单位基因便取代了原来的等位基因。DNA 的其他突变方式以一个或多个核苷酸为单位发生的，或被从一个序列中删除，或被插入。

基因突变的后果有三种：对原有生物功能无或无明显影响；使某种已有生物功能减退或丧失，严重者甚至造成死亡；新功能的获得。并非所有的基因突变都是有

---

① 程介克：《人的基因组及 DNA 序列分析》，《分析科学学报》1994 年第 10 卷第 2 期。

害的，或者对某种功能并不会产生明显影响。有时候，基因突变产物的功能可能更适合机体所处的特定的环境条件，因而更利于其存活，这种突变就可能导致新物种的出现，生命从而产生进化①。分子生物学家发现变异是以一定的速率进行的，即遵循生物分子钟的原理，通过对遗传变异的分析确定多长的时间内会发生变异。这样，可以通过分析不同个体和不同种群之间基因的相似程度，来确定不同种间的遗传距离及其发生分离的年代。

（三）古 DNA 特性

所谓古 DNA，是指那些从动植物残骸（化石、亚化石、博物馆收藏的标本、考古学标本）中提取出的 DNA 分子。古代 DNA 的年代范围可从数千万年前到 100 年以内，研究材料包括古人类化石、发掘所获的人类和生物骨骼、牙齿、干尸、木乃伊等。

1. 古 DNA 的损伤

生物体死亡后，其原有的 DNA 分子结构就开始遭到化学、物理损伤。诸如水解、氧化、背景辐射等作用，有时一些细菌释放的酶类也会对 DNA 产生损伤作用。随着时间的推移，生物体中的 DNA 分子日趋减少。研究表明，古 DNA 所受的损伤并不与时间成直线关系，在生物体死亡后的一段时间里 DNA 的降解最快，随后很快下降。

目前看来，古生物体内的 DNA 保存的好坏与否似乎与埋藏环境的关系更为密切，而与生物体的年代间的关系相对要小些。在一些特定的埋藏条件下，如短距离搬运、快速埋藏、迅速脱水、低温、缺氧、中性 pH 值、高盐分、成岩作用影响小等，古生物化石或标本中 DNA 的保存状况相对较好。

基于古 DNA 的特性，在选择研究对象上最好是片段长度适合、高异位点、高拷贝的样品。古生物线粒体 DNA 就满足这样的要求。

2. 线粒体 DNA

所有真核生物的细胞中都含有线粒体（Mitochondria），其形状为线状、棒状或粒状，其功能是产生能量以维持细胞的活动。由于细胞需要能量的不同，一个细胞中可以含有 1 000 ~ 10 000 个线粒体 DNA。

线粒体 DNA（mitochondria DNA，mtDNA）是双链的超螺旋环状分子，它可以进

① 阎隆飞、张玉麟主编：《分子生物学》，中国农业大学出版社 1997 年版。

行半保留复制(Semiconservative Replication),即每个子代DNA分子中的一条链来自亲代,另一条是新合成的,亲代DNA分子中只有一条链保留在子代DNA链中。线粒体DNA另一个比较突出的特点是环复制,即两条DNA链不同时开始复制,而是一条在前,一条在后,因而在复制中生成D环。

线粒体的遗传体系主要有以下几个特点:

(1)线粒体DNA都有编码作用。几乎所有动物的线粒体DNA碱基都有编码作用,或者编码蛋白质,或编码rRNA(核糖体RNA)和tRNA(转运RNA)。这些基因在线粒体DNA分子上紧密排列,相邻基因间没有或仅有很少几个非编码碱基相隔。线粒体是生物氧化的场所,呼吸链中的某些蛋白质或酶的编码基因就在线粒体DNA上。图13.6是人类mtDNA的基因组结构图,它是全长约16 569bp的环状分子。基因组织结构图分为两部分。外环表示从重链(H链)上转录的基因,内环

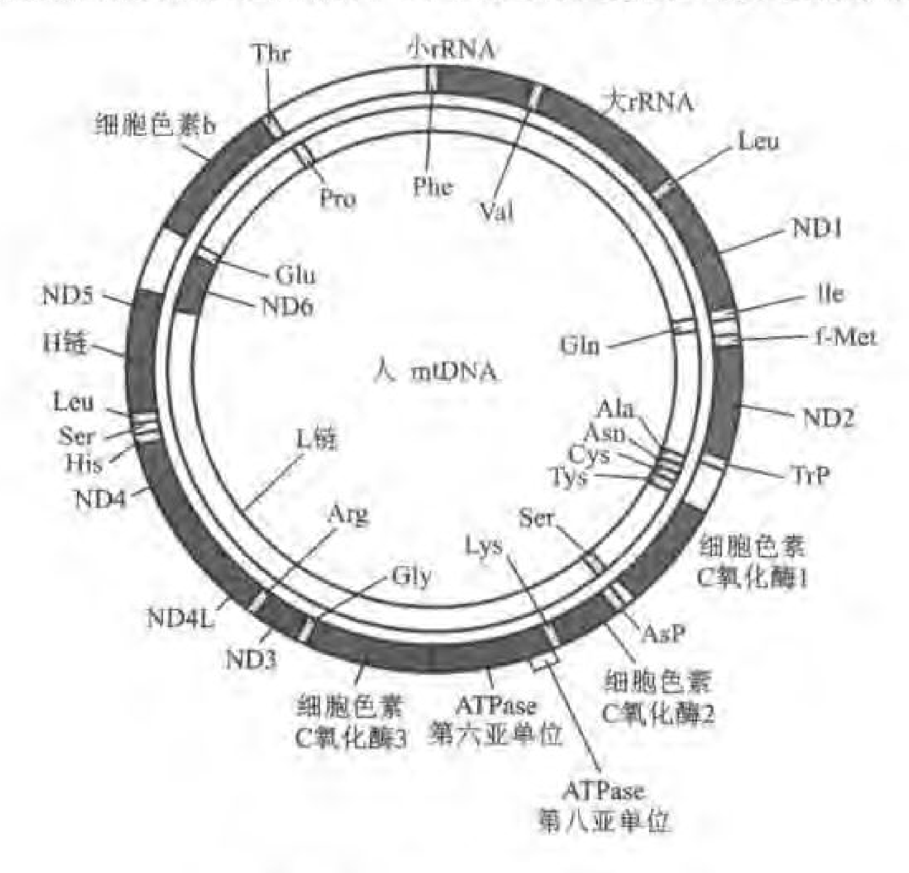


图13.6 线粒体基因组结构图

表示从轻链(L链)上转录的基因。重链和轻链上的编码物各不相同,人类线粒体基因组共编码了37个基因。图中用小写字母表示其对应的氨基酸,分别用其所携带的氨基酸或用各种亚级结构单位表示。

(2)线粒体除具有DNA外,还具有自己的蛋白质合成体系。线粒体内有进行蛋白质生物合成所必需的各种RNA(rRNA、tRNA与mRNA)。这些成分与细胞质的相应组分不同,而与细菌的比较相似。此外,由细胞核DNA编码并在细胞质中合成的蛋白质(酶类)也可输入线粒体中,mtDNA的复制(图13.7)和转录都是由自己的聚合酶来完成的,不受细胞核的控制,而且在许多方面都与原核生物的相似。另一特点是,参与呼吸链的一些酶成分是受双重遗传控制的,即酶的部分亚基为细胞核基因所编码,另一些亚基则是由mtDNA编码的。根据线粒体的这些特点,L. Margulis在1985年提出了线粒体形成的内共生学说。在进化过程中原始的厌气细菌吞噬了原核生物(如细菌、蓝绿藻等)形成共生关系。寄主为共生者提供营养和保护,共生者为寄主提供能量生成系统。最终,共生者演化成细胞的组成成分——线粒体。

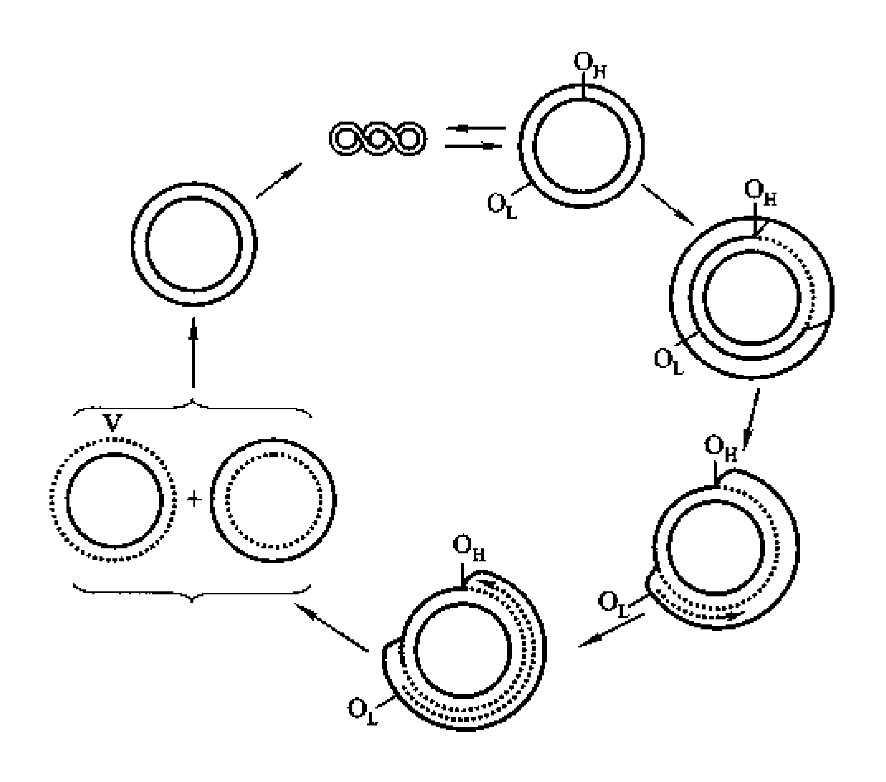


图13.7　线粒体DNA的复制

(3) 线粒体基因组突变频率高。线粒体具有自身复制和分裂增殖的能力,线粒体 DNA 的变异速度远远大于细胞和 DNA,而且还有叠加效果,变异幅度可以逐渐加大。其基因组的突变频率远远高于核基因组的突变能力,线粒体基因组中两段长度可变的非编码区,其变异速度在线粒体基因组中最快,变异形式主要以碱基替换为主,插入、缺失较少,无重组现象。在高可变区中,不同群体间几乎无共享序列,即使在同一群体中,除母性血亲外,也没有相同的序列。这一点对古 DNA 研究是非常重要的,因为对于生物进化水平的研究来说,突变频率高的基因组比突变频率低的基因组更为有效。

(4) 线粒体遗传方式主要是母系遗传,也可以通过精子进行父系遗传,但不同祖先的线粒体间存在排斥关系,在卵子中的线粒体通过编码特殊的酶将父系的外来线粒体分解。所以,对线粒体 DNA 的系统分析可直接反映出人群或种族的母系历史。

基于以上原因,线粒体成为群体水平和系统发育研究中应用最广泛的分子之一。其中,线粒体高可变区在古 DNA 研究中最多。换而言之,mtDNA 集中在细胞层内,生产细胞所需的能量,并只通过母系传递。由于 mtDNA 只会经突变发生变化而不受父系的影响,所以它显示的突变速率可作为一种尺度来追溯母系遗传关系和测量人群的谱系关系及分离的时间。

3. Y 染色体与常染色体

除了线粒体 DNA 在考古中应用得较多外,原则上分析古生物体的 Y 染色体(Y chromosome)和常染色体 DNA(Autosome DNA)也可以进行相关研究。

人类的 Y 染色体是小的近端着丝染色体,由大约 50MD 核苷酸构成。在正常个体之间,Y 染色体长度存在多态现象,是长臂异染色体不同造成的。人类的 Y 染色体和其他哺乳动物的 Y 染色体一样,由两个功能不同的部分组成。一个功能区负责决定男性性别和生育能力,成为 Y 特异区(Y-DNA),在 Y-特异区存在与男性性别有关的基因 SRY、AZF、TSPY 等。另一个功能区是在男性减数分裂过程中参与同 X 染色体的配对、同源重组和分离,已证明在 Y 染色体的断臂末端(约 2.6MD)和长臂末端均存在与 X 染色体的同源区,即拟常染色体区(PAR)。这两个区域有不同的遗传特性,X、Y 染色体可以在拟常染色体发生同源重组,而 Y 特异区则不发生重组,从而保证性别决定的染色体基因不被破坏。Y 染色体主要表现为单倍型的分布,处于半合子状态,父系遗传,除拟常染色体区外的 Y-DNA 在

减数分裂过程中不发生重组，因此不同群体或个体的Y-DNA序列多态性位点就是良好的遗传标志。原则上，通过分析特定的Y染色体单倍型分布，就能勾画出Y染色体进化树，追溯现代人类的父系祖先，是母系遗传的线粒体DNA研究的有效补充。但是，由于Y染色体是单基因拷贝，扩增困难大，在古DNA中的应用并不多。

1995年，分子生物学家利用Y染色体上的一个基因(ZFY)，推算现代人开始出现的年份[①]。他们从世界各地(包括非洲、亚洲、大洋洲、欧洲、北美及南美洲)挑选了38个男人来作分析。ZFY共有729对碱基(Base Pairs)。科学家把每一个人的这个基因分析完后，发现这38个人的基因序列都是相同的。他们利用现代人类与猿猴这个基因序列的差异，以及进化论认为的人类与猿猴开始分别演化的年代，推算出人类祖先出现的年代是在27万年前，或是在2.7万年前。他们是用了两个不同的模式来推算，得到差异这么大的两个数字。同时他们还用了一个极不可能的假设，就是在过去几万或几十万年中(除了最近几千年)，男性的总数一直只有7 500个左右。如果男性组的数目多一些的话，所推算出来的年份就会更短。这个研究另有一个缺点，就是所取用的染色体基因太小，所以推算出来的年数不能很精确。后来又有两个研究利用相似的方法，检查Y染色体上较大段的基因序列。其中一个研究利用一个有2 600对碱基的基因，所推算出来的年代是18.8万年(上下限是5.1万年到41.1万年)[②]。另一个研究是采用Y染色体上一块大很多的段落(有18 300对碱基)，这个研究的结果是4.3万年(上下限是3.7万年与4.9万年)[③]。最后这个研究依相同的原理，用妇女的线粒体DNA和猿猴的DNA，推算出来的年份是9万年至12万年。

常染色体DNA的方法与mtDNA不同，前者通过基因频率揭示人群之间的关系，而后者是借助于突变数量的差异重建个体mtDNA系统。我们知道，细胞内最大的细胞器是细胞核，在细胞核中DNA与核蛋白相结合且以染色体的形式存在。

---

① Paabo S. The Y Chromosome and the Origin of All of Us (men). Science, 1995, 268: 1141; Dorit R L, Akashi H, Gilbert W. Absence of Polymorphism at the ZFY Locus on the Human Y Chromosome. Science, 1995, 268: 1183.

② Hammer M F. A Recent Common Ancestry for Human Y Chromosomes. Nature, 1995, 378: 376 - 378.

③ Whitfield L S, Suston J E, Goodfellow P N. Sequence Variation of the Human Y Chromosome. Nature, 1995, 378: 379 - 380.

人类的细胞核内有22对常染色体和一对性染色体。常染色体反映了核DNA的多态性，据此可以推测人类的群体遗传和人类的演化。但是，由于目前理论和技术上的原因，常染色体DNA与揭示人类演化过程的距离很大①。

二、古DNA的分析程序

古DNA的分析流程如图13.8所示：

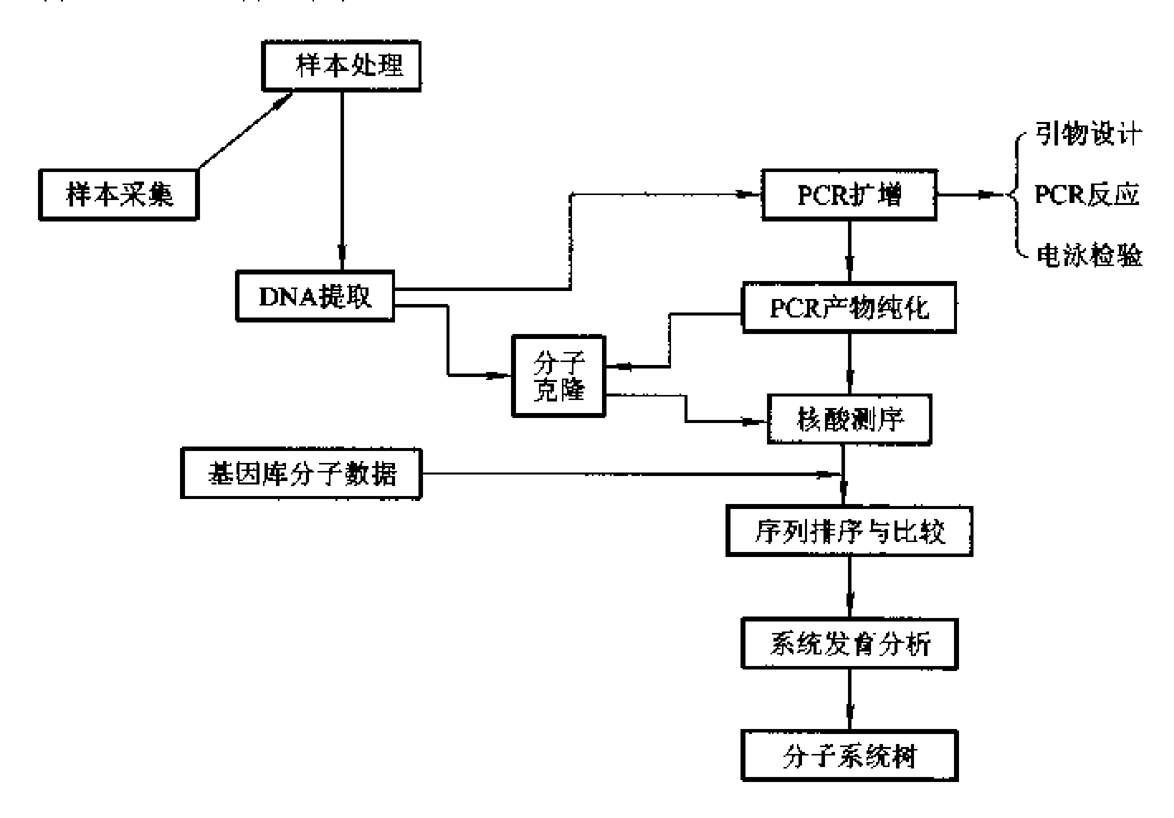


图13.8　古DNA的分析流程图

采自崔银秋：《新疆古代居民线粒体DNA研究——吐鲁番与罗布泊》，吉林大学出版社2003年版。

从上面的流程图中，可以看出DNA的分析主要包括如下步骤：

① 崔银秋：《新疆古代居民线粒体DNA研究——吐鲁番与罗布泊》，吉林大学出版社2003年版，第30—34页。

（一）DNA 的提取

DNA 是一种很不稳定的生物大分子，在生物死亡后会遭到各种降解和破坏，古生物体内残留的 DNA 一般也都断裂成很短的片段，长度从几十到几百个 bp 不等。因此，古 DNA 样品的选取和提取要科学。实验应尽可能地在从未进行过现代 DNA 分析的实验室内进行。实验所用设备和器具，如取样用的钻头、移液器、离心机、研钵以及化学试剂等，必须严格与现代的 DNA 研究的同类器具和药品分开。

DNA 的提取就是用 DNA 抽提缓冲液使核酸从细胞或细胞残余物中释放出来的过程。提取成功与否取决于被提取 DNA 的质量、数量以及 PCR 抑制物的完全去除。目前，古 DNA 提取的方法主要参考现代核酸的提取技术，只是在提取缓冲液上做些修改以适应古 DNA 的特点和防止污染。目前，提取古 DNA 的方法有蛋白酶 K 消化法、有机提取法、硅胶纯化法。

在利用 DNA 抽提液之前，首先要将样品研碎。一般是先用液氮使样品速冻，然后用研钵或研臼将样品研碎，之后加入 DNA 抽提液。在这一过程中加入少量蛋白酶可以降解样品中的蛋白质，将附着在蛋白质上的核酸释放出来，有利于 DNA 的提取。

样品经抽提液处理后，抽提物中除含有 DNA 外，还含有蛋白、RNA 及其他有机质，因此须进行纯化。通常采用苯酚和氯仿来分离 DNA 和蛋白及其他有机质。

经过分离后，所得的抽提物中的 DNA 的含量通常都很低，一般要进行浓缩。通常采用酒精沉淀和不同浓度的酒精洗涤的办法。加入 2 ~ 3 倍体积的酒精，就可以很好地沉淀 DNA。

（二）PCR 扩增

DNA 提取后，接着进行 PCR 扩增。PCR 技术（聚合酶链式反应，Polymerase Chain Reaction，PCR）是美国科学家 Mullis K B 等人发明的，目前这一技术已在很大程度上替代了传统的 DNA 克隆方法。

PCR 技术的基本原理是：在特定的 DNA 序列中，设计一对很短的合成单链 DNA 片断引物，在聚合酶的作用下，引物与分解单链的 DNA 模板结合，从而使 DNA 分子随合成—变性—退火—合成的循环次数的增加而成几何级数的扩增，每一循环将使 DNA 分子数量增加 1 倍。这样，加入特定的引物，其只会与 DNA 模板上相对的特定序列结合并使其大量复制。也可用公式表示 PCR 扩增的过程：

94℃,180s→35×(94℃,30s→50℃,15s→72℃,40s)S6

此公式的意思是:在94℃下预热180秒,然后开始下面的35个热循环;每一个热循环包括:首先在94℃下的DNA变性30秒;引物结合阶段温度为50℃(视引物本身的溶解温度而有所不同),时间15秒,延伸阶段在72℃下进行,40秒(视扩增序列的长度而定)。S6表示温度梯度为每秒6℃(一般为每秒2~6℃)。由于扩增片段的长度通常为一百至数百bp,上述公式所列的延伸时间是足够的①。

PCR技术具有一些优势:

(1)高灵敏度。PCR技术可以扩增含量极微的DNA片段,理论上讲,只要样品中存在一条DNA模板,PCR就可以对其进行扩增。

(2)高选择性。PCR可以有选择地扩增所研究的DNA序列中一个"目标基因"序列,这样就允许研究者通过选择具有合适的突变速率的基因片段来研究在种级分类水平上或特定的时间间隔框架内的演化问题。

(3)高速度。PCR可以在很短的时间里使目标基因序列的数量成几何数级增长。一般来说,30个PCR循环可在一个小时左右完成,而其扩增的速度以2^n(n为循环次数)来计算,30个循环可使DNA分子数量增长2^{30}倍②。

在化石和考古材料中,由于生物死亡后经历了搬运、沉积、埋藏甚至成岩的过程,即使在超常条件下保存的材料,其DNA也均以微量或痕量形式存在。因此,具有高灵敏度、高扩增率和高速度的PCR技术无疑是研究古DNA必不可少的手段。

常规的PCR反应通常由微量的耐热聚合酶(如Taq聚合酶)、一对引物、DNA模板(欲研究的目标DNA)、带NH_4的PCR缓冲液和盐(如$MgCl_2$)等组成。PCR反应在专门设计的热循环仪上进行。其过程由预热及一系列热循环构成,每一个热循环由三个步骤构成。

(三)DNA测序

PCR扩增产物一般须经过电泳检测和纯化后,才能进行直接测序。在琼脂胶电泳检测中,一般除了有很强的一个目标基因片段外,有时还可观察到一些较弱的DNA片段,因此需要经过提纯以除去那些较弱的DNA片段,只保留目标基因片

① 杨群主编:《分子古生物学原理与方法》,科学出版社2003年版。

② 杨群主编:《分子古生物学原理与方法》,科学出版社2003年版。

段。总之,测序 DNA 模板的质量(纯度、浓度)会直接影响测序的效果①。

目前,DNA 序列测定的方法主要有两种:化学法和双脱氧法。化学法可以提供比较清晰的结果,但是较为费事。双脱氧法分析速度快而省事,但有时实验结果不够清晰。目前研究中,往往以双脱氧法为主,结合使用化学法②。

1. 化学法

化学法(Chemical Method)是 Maxam 和 Gilbert 发明的。其原理是用特异的化学试剂修饰 DNA 分子中的不同碱基,然后用哌啶切断多核苷酸链。所以,用四组不同的特异反应,就可以将末端(5′-端或 3′端)用放射性标记的 DNA 分子形成不同长度的寡核苷酸。这些寡核苷酸的长度相当于从特异反应引起的切点到标记末端之间的长度。用凝胶电泳将这些不同长度的寡核苷酸分离开来,即可读出所测定的 DNA 序列。

2. 双脱氧法

双脱氧法(Dideoxy Method)也称作酶法(Enzyme Method),是由 Sanger 于 1977 年建立的。其原理是利用 2′,3′-双脱氧核苷酸(2′,3′-dNTP)来终止 DNA 的复制反应。在 DNA 复制过程中,大肠杆菌 DNA 聚合酶催化多核苷酸链的延伸,单核苷酸链陆续连接在延伸链的 3′-OH 上。所以,此时如果连接上的底物为 2′,3′-dNTP 而非 2′-dNTP,延伸反应即告终止。在这个过程中会产生一系列长度不等的 DNA 片段,用凝胶电泳分离片段,即可从放射自显影上读出 DNA 的序列。

(四) 谱系树的构建

古 DNA 研究的主要目的,是根据古生物 DNA 的碱基序列数据,构建生物类群的谱系发育树(Phylogenetic tree,简称谱系树;又称为系统发生树、系统树或种系树)(图 13.9),即推测生物类群系统发育的分支样式。

常用的谱系树构建方法有简约法(Parsimony Method)、距离矩阵法(Distance Matrix Method)、最大似然法(Maximum Likelihood Method)。用于谱系发育分析的计算机软件也非常多,常用的有 PHYLIP、PSUP、MEGA 等。每种构建方法和分析软件都有各自的特点,研究者可以根据研究目的选择某种特定的构建方法和分析

① 杨群主编:《分子古生物学原理与方法》,科学出版社 2003 年版。

② 沈同、王镜岩主编:《生物化学》(下册),高等教育出版社 1999 年版。

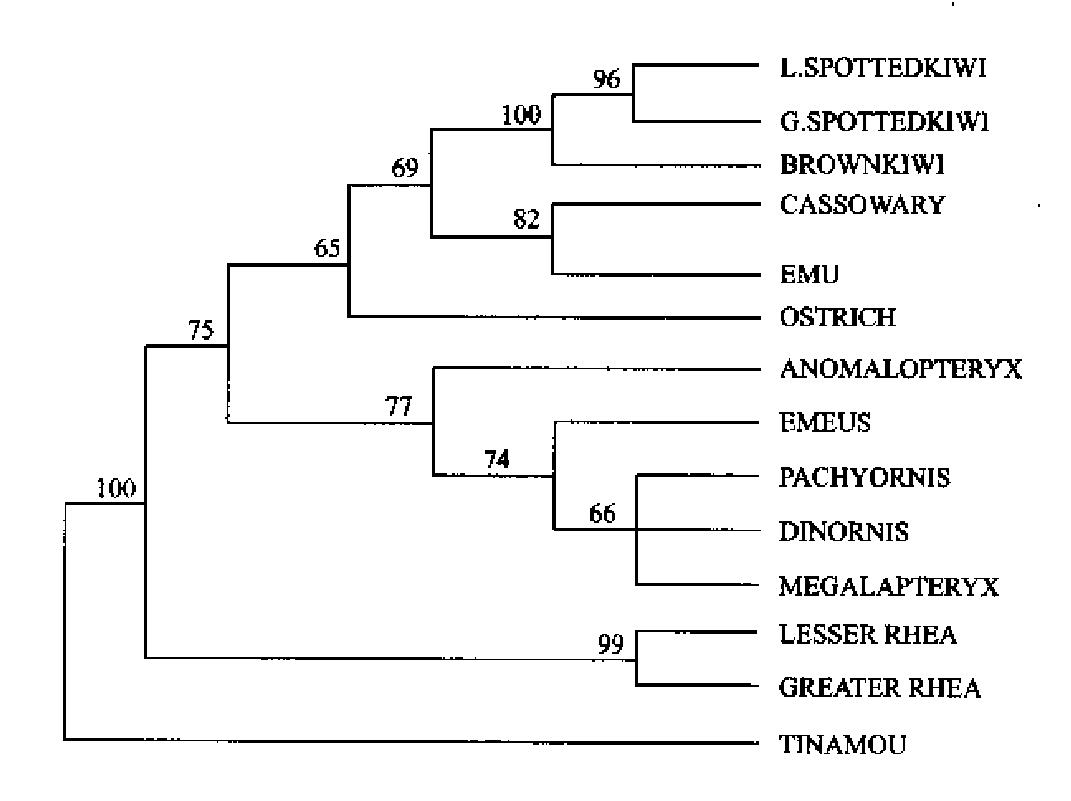


图 13.9 谱系树示意图

软件①。

在谱系树的构建中,DNA 序列中的每个位点都被视为一个性状,而将每个位点上的碱基看作是性状的状态。每个位点上的状态都有四种选择,即 A、T、G 和 C。经计算机利用特定的分析软件和方法处理,就可得到谱系树。谱系树中枝条的长度表示进化距离。长度越短,表明变异发生的时间越近,反之则变异发生的时间就越久。这样,整个谱系树清晰地展示出不同样品间的进化关系。再结合相关考古学证据,便可做出综合判断。

三、古 DNA 技术在考古中的应用

随着现代生物技术特别是 DNA 技术的飞速发展,对古代 DNA 的提取和研究

① 杨群主编:《分子古生物学原理与方法》,科学出版社 2003 年版。

不仅成为可能,而且已经取得了很大的成效。它与其他自然科学技术一样,应用于考古学研究时,最为显著的特征之一是其定量分析的手段及在此基础上所提供结论的客观性。古代DNA研究的其目的就是要跨越“时代的鸿沟”,将现代生物和古代生物之间的缺环连接起来。作为一个重要的研究手段,古DNA研究展示了它在考古学、法医学、古病理学等研究领域的应用价值①。

考古遗存中可能保存古代DNA材料有两类。一类是生物材料,如人类的骨头、牙齿和动植物遗骸;另一类是人类制作、加工或使用过的材料及其上所附的残存物,如生活用品陶器内的残留物,作为艺术品的岩画之颜料,动物皮毛和石器上所附的残留物等。其中人骨和牙齿是古代DNA研究的主要对象,人骨和牙齿结构较为稳定,经长期埋藏仍然能保存DNA。古DNA分析通常可以提供三个层面上的信息:其一是个体与个体之间的遗传信息,如性别鉴定、直系亲属关系鉴定等;其二是群体内部的遗传信息,如亲缘、家庭系统的鉴定等;其三是群体之间的遗传信息,如进化顺序、演变先后等,可为探索考古文化类型和聚落之间的关系提供依据。

在考古学中,古DNA技术可望解决如下关键问题:一是结合现代人的mtDNA数据,研究人类起源、演化变异和迁移的历史过程;二是对同一古代遗址、墓葬内不同个体、群体的DNA分析可以获取群体内部信息,进而可以构建家庭谱系,判断社会性质等;三是利用古代动物的DNA来研究它们的起源、传播、驯化和在进化树上的位置,还可以揭示古人类生活所依赖的环境和动、植物驯化的历史年代以及人类最早从事农耕的证据。事实上,古DNA的研究结果已经不断地将动物驯化和农业耕种年代向更早的时间推移。四是结合其他考古证据和科技手段,研究文化之间的动态交流;五是对考古遗存的残留物中古代DNA提取和分析可以提供器物用途和制作工艺等方面的信息;六是对生物排泄物的DNA分析可以推测古代先民的食谱、病理和环境等多方面的信息②。以下以关于人类起源的研究为例。

人类的起源和演化始终是人类最为关注的问题之一。目前,关于现代人类的起源(何时、何地、如何起源),有多地区连续进化多源说和非洲单一起源说。

非洲单一起源说最重要的依据之一便是用线粒体DNA方法构建的线粒体

① 沈同、王镜岩主编:《生物化学》(上册),高等教育出版社1999年版;阎隆飞、张玉麟主编:《分子生物学》,中国农业大学出版社1997年版。

② 张玉静主编:《分子遗传学》,科学出版社2002年版。

(mtDNA)夏娃说。此说基于两个假设：其一，人类的 mtDNA 由母系遗传，不发生重组，其多态性是突变积累的结果；其二，mtDNA 的突变是以稳定的速度发生的，该速度每 100 万年为 2% ~4%。夏娃假说出自两个实验室的结果。

1987 年，英国第 1 期《自然》杂志上刊登了美国加州大学伯克利分校三位分子学家的题为《线粒体 DNA 与人类进化》的文章，他们分析了亚洲、非洲、欧洲、新几内亚和澳大利亚的 147 名现代妇女胎盘的 mtDNA(图 13.10)，结果揭示所有的样品分为两大组：来自非洲的样本为一组，而非洲以外的其他样品处于一组。这说明其他各洲的样本的同源性(近似程度)远远大于它们同非洲样本之间的亲近程度。另外，非洲组内部不同样本之间的变异程度大于非非洲组内部的变异程度。由此得出第一个重要结论，即现代人类起源于非洲。第二个重要结论是，线粒体夏娃没有与现代人以前的人群杂交，分析结果是现代人的祖先可追溯到大概 20 万年前的一个非洲妇女。凯恩称之为线粒体"夏娃假说"(Evahypothesis)，我们的线粒体原本来自这位女祖宗。这位女祖宗的后代在十余万年前走出非洲，走向世界各地，以后分化为不同的人种。①

1994 年以来，耶鲁大学的 Dorit 和雷赛斯特大学的 Armour 等分别对现代各人种的细胞核内 Y 染色体(父系单性遗传)的研究结果也支持了上述结论。美国斯坦福大学也利用 Y 染色体指标揭示了东亚人群父系传承的研究。通过对 21 个中国不同民族的人口、22 个省份的汉族人口、3 组东北亚、5 组东南亚人口以及 12 组非亚裔人口大量标本分析，表明东南亚人口要比亚洲北部的人口拥有更大的变异，这意味着东南亚大陆应是东亚现代人群最早的定居点。根据 Y 染色体变异速率的推算，晚期智人进入东南亚的时间大约在距今 60 000—18 000 年前，紧接着开始了向北方的迁徙过程。与此同时，另有一批晚期智人群体从东南亚开始向南迁徙，进入马来西亚和印尼并到达太平洋群岛。Y 染色体的分析结果与 mtDNA 的证据完全吻合，进一步证实了"夏娃理论"和东亚人口自南向北迁徙扩散的模式。② 东亚 12 000 个 Y 染色体研究支持现代人起源于非洲。

1997 年，德国莱茵汉斯博物馆和慕尼黑大学的分子人类学家成功地从 10 万

① Cann R L, Stoneking M and Wilson AC. Mitochondrial DNA and Human Evolution. Nature, 1987, 325: 31 - 36; Cann R L. DNA and Human Origins. Ann Rev Anthropol, 1988, 17: 127 - 143.

② 陈淳：《"夏娃理论"与中国旧石器时代考古》，《中国文物报》2001 年 11 月 2 日第 7 版。

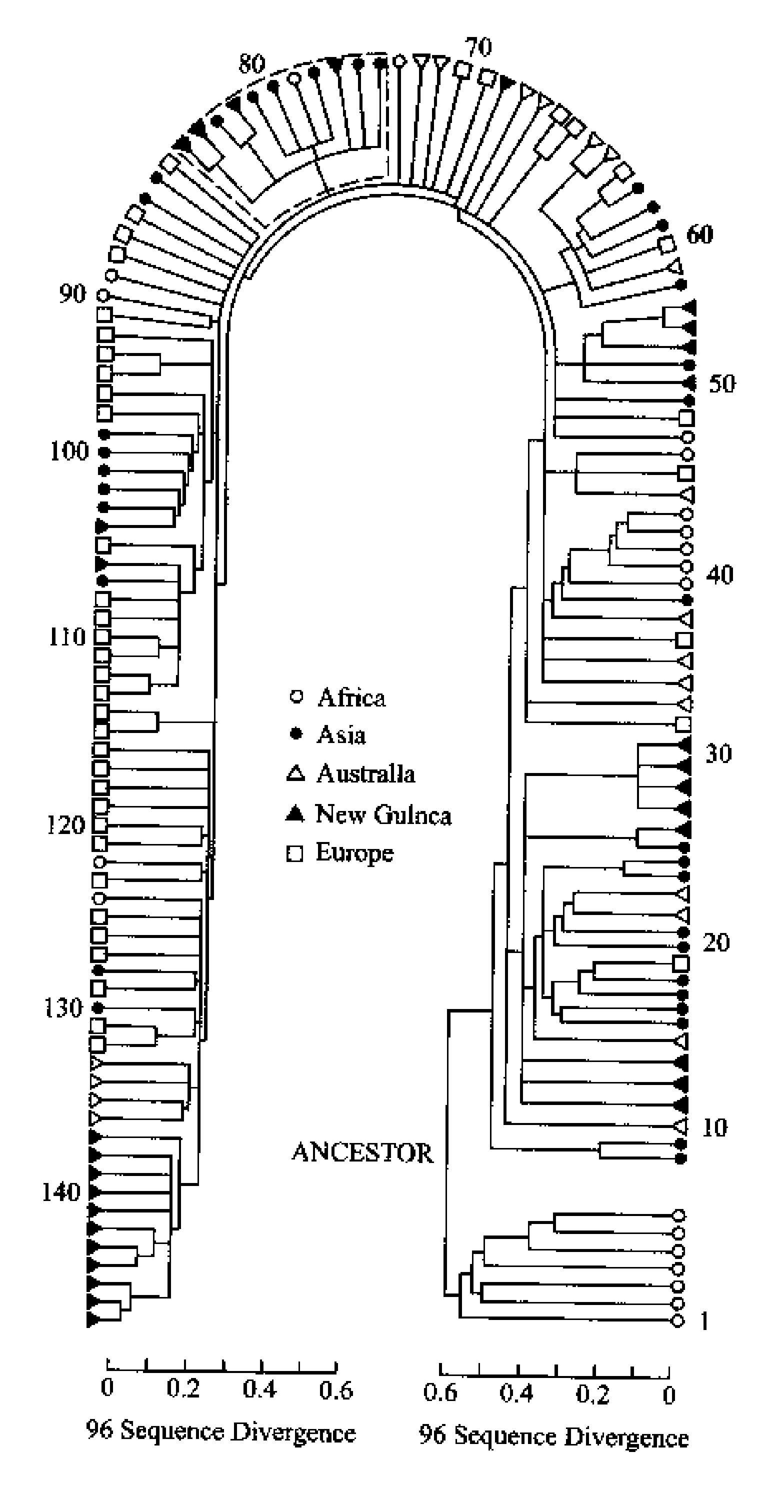


图 13.10　计算机绘制的 147 名世界各地妇女的 mtDNA 谱系树

年前的尼安德特人上臂骨中提取了 DNA 片段,并采取 PCR 分析方法进行繁殖、分析,再将这些古代基因与今天世界各地数百人的遗传信息相比较,在 378 个碱基的 DNA 片段中,尼安德特人与现代人的差异是 26 个,而现代人族群之中,mtDNA 的平均差异是 8 个,而这 8 对跟与尼安德达人相异的那 26 对完全无关。这表明尼安德特人对现代人的 DNA 物质没有任何贡献,大约在 60 万年前两者有最后的共同祖先①并在系统演化树上分离(图 13.11)。1999 年,第二例尼安德特人的线粒体 DNA 序列被测出②,该序列与第一例 DNA 序列有 3.48% 的差别。谱系研究结果表明两例尼安德特人的遗传关系十分接近,并在分支树上与现代人明显分开,进一步证明了尼安德特人的线粒体 DNA 与现代人的线粒体基因库无关。由于这两例尼安德特人的 DNA 分析是在不同的实验室进行而得出相同的结果,这就为非洲起源说提供了有力支持。

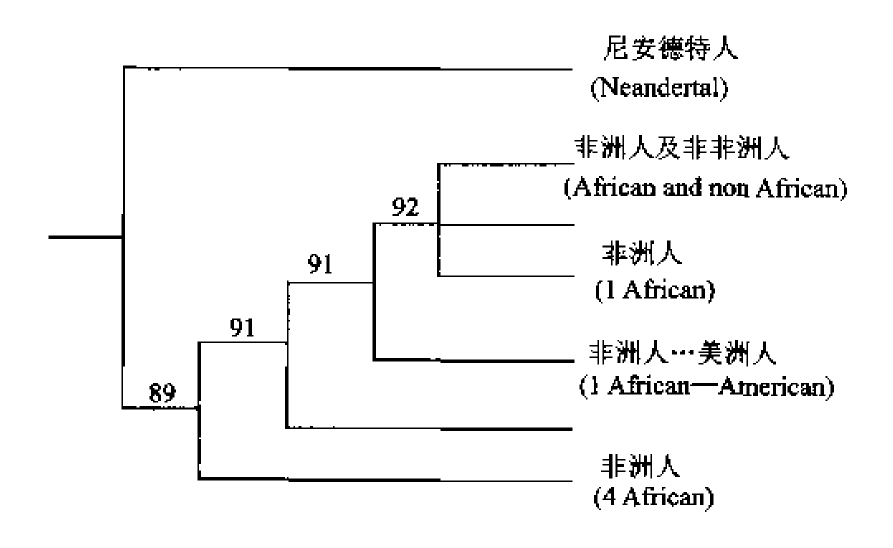


图 13.11 尼安德特人谱系

1998 年,我国 12 位生物学家、医学家也在美国科学院院报上发表文章支持非洲起源说,他们对中国各民族、各语系 28 个个体和日本人、朝鲜人、美洲土著人、澳

① 崔兹:《DNA 资料重绘人类演化图》,《江汉考古》1997 年第 4 期

② Ovchinnikov I V, Gotherstrom A, Romanova G P, et al. Molecular Analysis of Neanderthal DNA from the Northern Caucasus. Nature, 2000, 404: 490—493.

洲人、新几内亚人、高加索人及非洲人的DNA作了分析，显示全部中国样本加上东亚、北亚样本聚成一类，然后按遗传距离远近依次为美洲土著人、澳洲人、高加索人和非洲人，即源自非洲的现代人构成了目前亚洲人口基因库的主体。他们还指出我国的南方人和北方人在种系上发生树枝图上分成两组，北方人可能是由南方迁移来的，而不是通过中亚移民过来的。中国遗传学家认为，现代中国人的祖先约在6万—4万年前从非洲出发，向东经印度洋，取道东南亚进入中国华南。这一观点没有得到中国古人类学家、考古学家的认同。

多中心说也有一些支持的证据。由于新大陆群体在线粒体多态性上呈相对衰弱，新的基本谱系的确认就成为古DNA研究的直接应用，而且从选择的位置和时代不同的样本的遗传分析，可以直接确定古人类迁徙的种群数目。M. Stoneking等人提取出史前美洲土著居民Oneota人群的线粒体DNA，将之与哥伦比亚的史前群体、现代美洲和亚洲的线粒体DNA谱系比较，结果显示除了普遍认为的A、B、C、D四个谱系外，还有以前一种未发现的谱系（他们称之为X组）。通过系统发育分析，他们反驳了三次迁徙假说，认为只有一次人群从亚洲迁徙到美洲①。古DNA的研究还显示，美洲的古代和现代人群有较好的连续性。

除了美洲外，其他地区也有发现。比如，J. Gregory等人测定了10个古澳洲人的序列（距今15 000—6 000年），其中的LM3序列与第11号染色体的mtDNA插人片段同源，这个序列可能来自于现代人类线粒体最近的祖先。这个结果表明，现代人起源最早的已知mtDNA谱系在澳洲出现过，与现代人的系统发育分析显示LM3位于东非洲的最深的分支上，而其他的古欧洲序列则与现代人接近。这表明在澳大利亚出现的早期现代人，其演化路线并非来自非洲。这个结论对非洲单一起源说提出质疑②。

另外，研究者从古代美洲印第安人人骨和古代太平洋复活岛的居民骨骼中提取了DNA，发现有9－bp缺失序列，表明这些人群的起源与亚洲人类有关③。其他

---

① Stone A C, Stonking M. mtDNA Analysis of a Prehistoric Oneota Population: Implications for the Peopling of the New World. Am J Hum Genet, 1998; 62: 1153－1170.

② 引自崔银秋：《新疆古代居民线粒体DNA研究——吐鲁番与罗布泊》，吉林大学出版社2003年版，第62－63页。

③ 刘武等：《DNA与人类起源和演化——现代分子生物学技术在人类学研究中的应用》，《人类学学报》14卷第3期，1995年8月。

考古学、语言学的证据似乎也表明,太平洋美拉尼西亚(Melanesia)群岛上的人种可能起源于东南亚岛屿,并被称为通往玻利尼西亚(Polynesia)的"特快列车"。这说明这些人群的起源与亚洲人类有关。但是,1997 年 E. Hagelberg 和他的同事们成功地从美拉尼西亚群岛上与当地文化有关的古代埋葬的遗骸中提取出线粒体 DNA,在古 DNA 中并没有发现 9 个碱基缺失的现象①。如果这一发现正确的话,说明古美拉尼西亚人只是先前存在的古美拉尼西亚人种的积累。

所以,科学家们在用现代人的 cmtDNA 外,试图用古代人的化石标准中的 cmtDNA 进行人类起源的研究。

第三节　牙齿人类学研究

牙齿人类学(Dental Anthropology)研究近十几年发展很快。牙齿人类学研究主要是通过对人类牙齿的形态与测量特征、生长发育状况、磨损形式和程度、牙齿疾病等方面的分析,以推测当时人类的生存环境、人群关系、食物构成、健康状况、经济类型、行为模式等方面的信息。

一、牙齿的形态研究

遗传学知识告诉我们,大多数人类的牙齿的非测量形态特征受遗传因素控制,并具有明显的群体分布差异,所以可用牙齿形态的特征来探索人群的亲缘关系、人类的起源和演化。

国外以美国亚利桑那州立大学人类学系特纳(C. D. Turner)等人的"现代人起源的巽他型牙齿特征假说"最引人注意,他们在研究了新石器时代以来亚洲和太平洋地区人群的牙齿形态后认为,该地区存在两种牙型:巽他类型(Sundadonty)和中国型牙(Sinodonty)。巽他型牙简单、原始,包括东南亚地区和印度尼西亚地区各人类群体,日本绳纹人、阿伊努人及太平洋地区的玻利尼西亚和密克罗尼西亚;中国型牙复杂、特化,包括中国、朝鲜、蒙古、日本、西伯利亚等亚洲东北部地区人类以及美洲印第安人。这两种牙齿特征的差异在旧石器时代晚期就已形成,巽他型牙

① Hagelberg E. Ancient and Modern Mitochondrial DNA Sequences and the Colonization of the Pacific. Electrophoresis, 1997, 18: 1529 - 1533.

首先形成于巽他群岛，再向周围扩散；具有巽他牙齿特征的早期东南亚人类沿亚洲大陆一直扩散到日本的北海道，形成了日本的绳纹人及其后代阿伊努人，而巽他类型的另一支通过亚洲大陆内陆向北扩展并逐渐特化形成具有中国型牙齿特征的东北亚人类[1]。

刘武根据8项牙齿形态特征和27项牙齿特征的出现率计算了亚洲各人类群体之间亲缘关系的MMD系数和聚类分析，结果支持特纳的"现代人起源的巽他型牙齿特征假说"（图13.12）[2]。

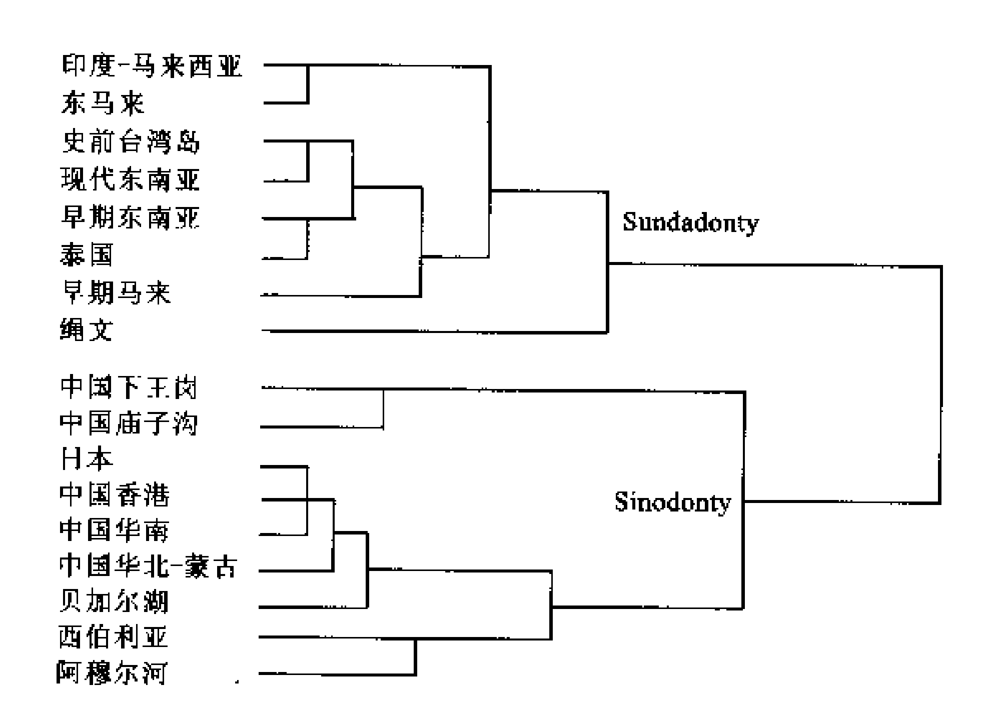


图13.12　根据牙齿形态特征出现率进行聚类分析绘制的反映亚洲地区人群亲缘关系的树状图

采自刘武：《华北新石器时代人类牙齿形态特征及其在现代中国人起源与演化上的意义》，《人类学学报》1995年第14卷第4期。

① 张君：《古代人骨研究的新方法》，《中国文物报》1996年5月19日第3版。

② 刘武：《华北新石器时代人类牙齿形态特征及其在现代中国人起源与演化上的意义》，《人类学学报》1995年第14卷第4期；刘武：《牙齿人类学与蒙古人种起源》，《化石》1995年第4期。

研究表明,影响与控制人类牙齿非测量特征与测量特征表现特点的因素不尽一致。在长期的人类演化过程中,牙齿非测量特征的表现方式在很大程度上是受遗传因素控制的,环境作用的影响力则要小得多。新的牙齿非测量特征的出现或牙齿非测量形态特征出现率的急剧变化通常是突变作用、遗传漂变或群体融合(基因交流)的结果。相比之下,影响牙齿大小变化的因素则要复杂得多。从短期意义上看,遗传因素在决定人类牙齿大小方面仍然起着关键的作用。但在长期的人类演化过程中,牙齿大小的变化往往在更大程度上反映了环境因素,尤其是人类文化发展的影响。如人类的饮食构成、食物制作技术及工具的使用与发展等以不同的方式影响着牙齿及其他咀嚼器官的功能,最终通过选择的作用导致了牙齿大小的改变。从总体趋势上看,在人类整个演化过程中,随着食物制作技术的提高、食物日趋精细及工具的发展,牙齿尺寸呈缩小趋势。刘武根据 Brace 等提供的分析数据绘制了人类牙齿缩小的趋势图(图 13.13),南方古猿牙齿总面积为 2 000 平方毫米,到直立人下降到大约 1 600 平方毫米。从更新世中期的直立人阶段一直到距今大约 10 万年前的更新世晚期人类牙齿尺寸变化不大。从距今 10 万年开始,人类牙齿急剧缩小并呈现出种族群体及区域性的差别。

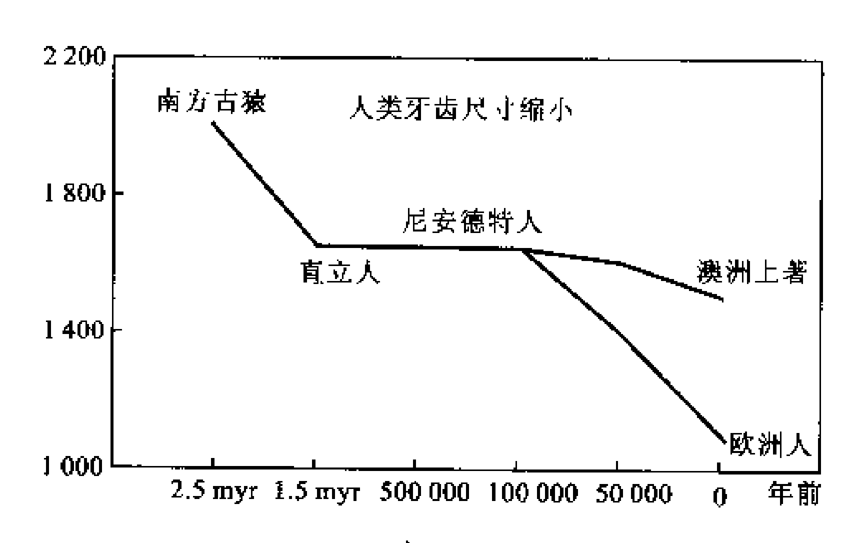


图 13.13 人类牙齿缩小趋势

采自刘武:《中国古人类牙齿尺寸演化特点及东亚直立人的系统地位》,《人类学学报》1999 年第 18 卷第 3 期。

刘武通过对中国境内不同时代人类牙齿测量数据的分析,得出中国境内牙齿

演化的特点与国外学者对世界范围不同时代人类牙齿测量数据分析的结论基本一致。中国境内人类牙齿大小的总体演化趋势是从直立人到现代人牙齿尺寸缩小，其中在整个中更新世的直立人及早期智人阶段，中国境内人类牙齿尺寸变化不大。进入晚更新世后，在早期智人向晚期智人过渡的过程中，中国境内人类牙齿迅速缩小并接近现代人范围。中国直立人与早期智人在牙齿大小方面的相似性提示中国直立人与早期智人的生活环境和文化发展比较接近，中国旧石器文化特征的特性在一定程度上也支持这种看法。[①]

1990 年以来，我国学者在牙齿人类学的研究方面也做了一些工作，其中包括：朱泓对山西省忻州市游邀遗址夏代居民和内蒙古察右前旗庙子沟遗址新石器时代居民牙齿的测量与观察[②]；张振标对湖北长阳和山西大同出土的青铜时代以及北魏时期人类牙齿的观察[③]；刘武、朱泓对庙子沟新石器时代人类牙齿非测量特征的研究[④]；刘武对华北地区新石器时代人类与现代中国人在牙齿形态特征方面的比较研究[⑤]；刘武、曾祥龙对陕西陇县战国时期人类牙齿形态特征的观察[⑥]；刘武、王善才对出土于湖北省长阳县深潭湾崖葬墓的青铜时代人类乳齿的研究等[⑦]。

二、牙齿的磨耗分析

牙齿是由人体中最坚硬的组织构成，它可以很好地被保存下来；并且牙齿的磨损状况与人类的饮食习惯、生活水准、食物类型有直接的关系。所以，通过检测牙齿表面的摩擦痕迹可以推断人类的饮食。当然，牙齿的蛀蚀也能反映人类对糖和

① 刘武：《中国古人类牙齿尺寸演化特点及东亚直立人的系统地位》，《人类学学报》1999 年第 18 卷第 3 期。

② 朱泓：《山西省忻州市游邀遗址夏代居民牙齿的测量与观察》，《人类学学报》1990 年第 9 卷第 2 期。朱泓：《内蒙古察右前旗庙子沟新石器时代人类牙齿的形态观察》，《人类学学报》1993 年第 12 卷第 3 期。

③ 张振标：《长阳青铜时代与大同北魏朝代人类牙齿的形态变异》，《人类学学报》1993 年第 12 卷第 2 期。

④ 刘武、朱泓：《庙子沟新石器时代人类牙齿的非测量特征》，《人类学学报》1995 年第 14 卷第 1 期。

⑤ 刘武：《华北新石器时代人类牙齿形态特征及其在现代中国人起源与演变上的意义》，《人类学学报》1995 年第 14 卷第 4 期。

⑥ 刘武、曾祥龙：《陕西陇县战国时代人类牙齿形态特征》，《人类学学报》1996 年第 15 卷第 4 期。

⑦ 刘武、王善才：《湖北长阳青铜时代人类乳齿特征的研究》，《人类学学报》1998 年第 17 卷第 3 期。

淀粉类食物的消费程度。而古代居民的食物结构很大程度上取决于当时的社会经济水平,据此可以推测当时的经济类型。

人类牙齿的磨耗(Tooth Wear)是由于牙齿间的直接接触或牙齿与食物等外来物质的接触造成的齿冠釉质、本质,甚至齿根骨质的磨耗损失。牙齿的磨耗过程持续人的一生,而且受制于许多因素,主要有食物结构、食物制作技术、牙齿及整个咀嚼器官的健康状态、上下颌骨咬合关系,以及人类行为特征等。其中,食物结构如硬度较大和富含颗粒成分的食物会造成牙齿的快速过度磨耗,牙齿釉质发育不全或营养状况较差者也会加快牙齿的磨耗,因生存环境、生活习俗、咬合习惯、将牙齿作为非咀嚼的工具等也会造成不同的牙齿磨耗程度和磨耗方式①。

刘武等人分析了新疆、内蒙古、河南、山西 7 处遗址出土的代表正常死亡的青壮年个体的牙齿 6 525 颗,同时辅助观察了其他一些与古代居民食物构成和社会经济类型相关的牙齿和颌骨特征,讨论了新疆和内地居民直接食物构成和社会经济形态的差别②。

牙齿的平均磨耗级别、不同磨耗级别以及其他综合指标显示,生活在青铜—铁器时代的新疆和内蒙古居民的牙齿磨耗程度与内地新石器时代居民的牙齿磨耗程度大致接近。对牙齿平均磨耗及重度牙齿磨耗的分析表明各遗址基本相似(图 13.14),但新疆和内蒙古组个别牙齿的平均磨耗和重度磨耗超过内地的游邀组,同时年代最早的下王岗遗址居民的牙齿平均磨耗和重度磨耗总体上较其他各组低。这可能说明,这一时期新疆和内蒙古居民的食物结构和食物加工水平与内地居民存在一定差异;前者的食物类型更为粗糙坚硬,加工食物的工艺和技术较为原始,而后者居民的农业经济较发达、食物类型较软、食物制作技术亦较进步。新疆、内蒙古两地居民生活中狩猎—采集占较大成分和生活环境较为恶劣的观点在牙齿的生前脱落现象中也得到佐证。新疆和内蒙古组的牙齿生前脱落明显高于内地的下王岗和游邀组,两地大量出现非对称性、非规律性的牙齿生前脱落和门齿脱落现

① 刘武等:《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》,《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。

② 刘武等:《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》,《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。

象，这很可能与生活在恶劣环境下过度使用牙齿所造成的牙齿折断或崩落有关。刘武等人还认为新疆、内蒙古组上下颌骨骨质隆起明显，也暗示两地因生活环境恶劣而使颌骨承受很大的咀嚼负荷压力。

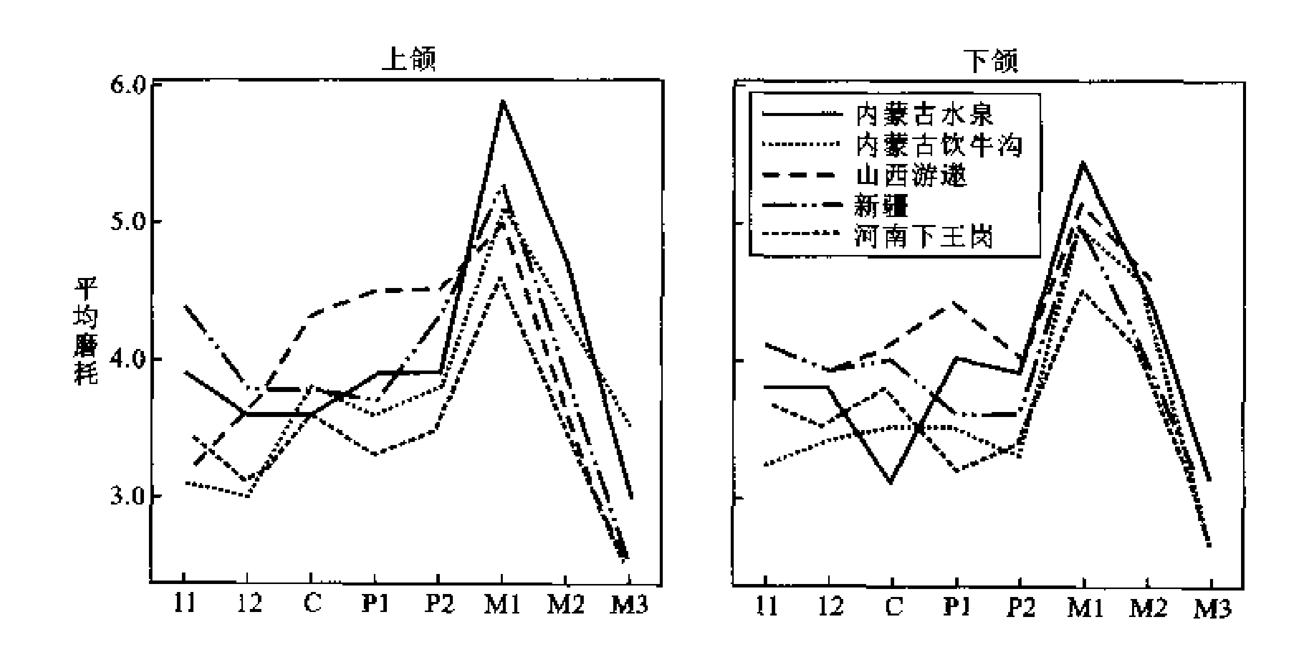


图 13.14　上下颌牙齿平均磨耗在各样本组的分布

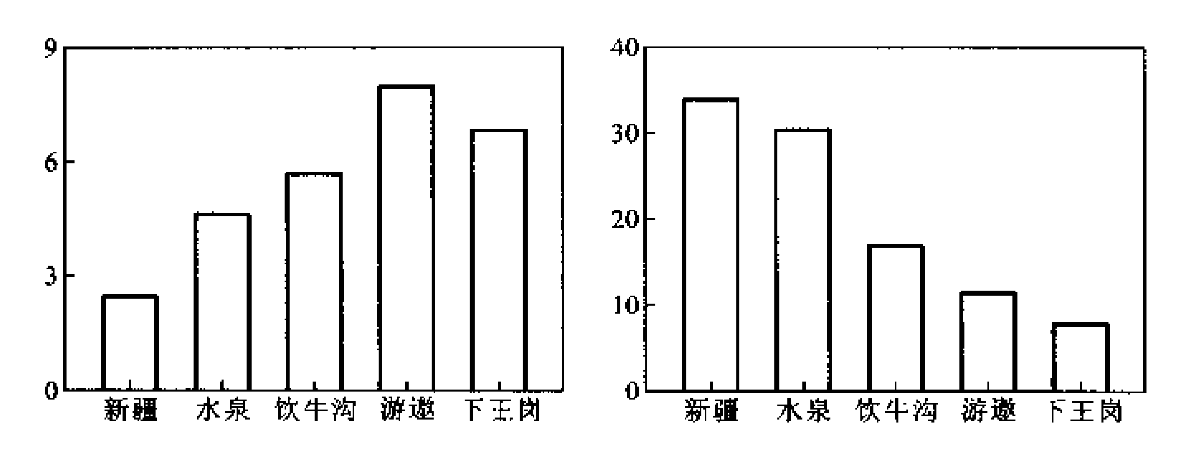
采自刘武等：《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》，《人类学学报》2005年第24卷第1期。

通过对各遗址牙齿的龋齿病统计发现，无论是个体出现率还是按牙齿出现率计算，新疆和内蒙古古代居民的龋齿病出现率均低于内地的下王岗和游邀居民（表13.1、图13.15）。一般认为，口腔中处理的碳水化合物的含量是影响史前人类龋齿发病率的最主要因素，龋齿病在农业型的古代居民中高于狩猎—采集型经济的居民。这些遗址龋齿病出现率的情况说明，时代较早的下王岗和游邀居民农业经济的比例高于时代较晚的边疆地区，且狩猎—采集经济在后者还占有较高比例。

表 13.1　各遗址龋齿及牙齿生前脱落出现情况

样本组	龋齿		牙齿生前脱落（个体出现率）
	个体出现率	牙齿出现率	
新疆	22.7%	2.5%	33.6%
内蒙古水泉	33.3%	4.6%	30.0%
内蒙古饮牛沟	25.0%	5.7%	16.7%
山西游邀	38.5%	8.0%	11.5%
河南下王岗	—	6.8%	8.1%

采自刘武等:《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》,《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。



龋齿病出现率(按牙齿出现率计算)　　牙齿生前脱落出现率

图 13.15　龋齿及牙齿生前脱落出现率在各样本组的分布

采自刘武等:《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》,《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。

此外,在新疆和内蒙古组标本中存在一些特殊磨耗现象,如第一臼齿严重磨耗、门齿和犬齿齿冠颊侧面局部磨耗(图 13.16—图 13.18),这些现象可能与当时居民生活在恶劣环境或适应狩猎—采集经济生活中过度使用牙齿有关。其中,第一臼齿的过度磨耗可能反映了当时居民习惯于用这个牙齿啃咬或研磨某种坚硬物品,门齿和犬齿齿冠颊侧面局部磨耗可能与当时居民使用前部牙齿磨蚀树枝和根茎等行为相关。牙齿标本前部和后部磨耗指数显示,新疆、游邀和下王岗三处遗址

的前部牙齿磨耗较后部牙齿磨耗明显严重，而内蒙古标本未见该现象，这或许反映了新疆和时代较早的内地居民的行为特征，以及新疆和内蒙古两地居民行为模式上的差别。



图 13.16　上颌前部牙齿舌侧磨耗

采自刘武等：《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》，《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。

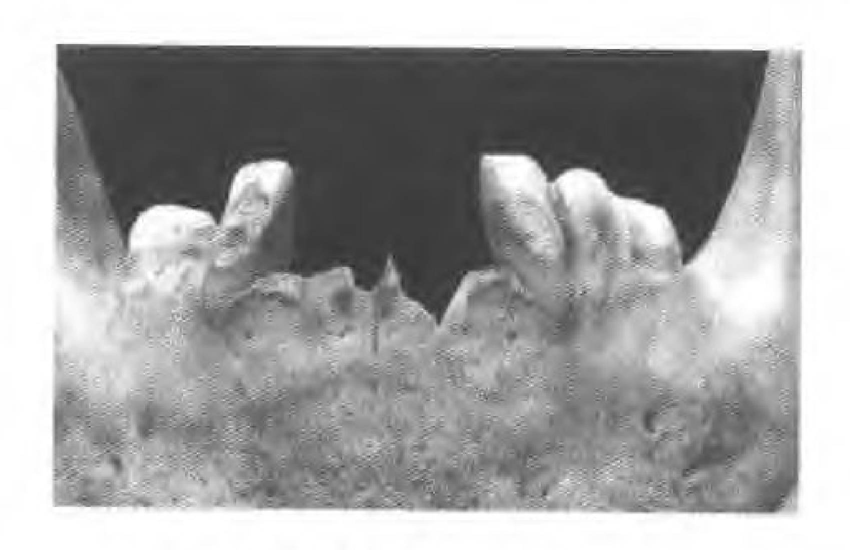


图 13.17　下颌犬齿颊侧面局部磨耗

采自刘武等：《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》，《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。

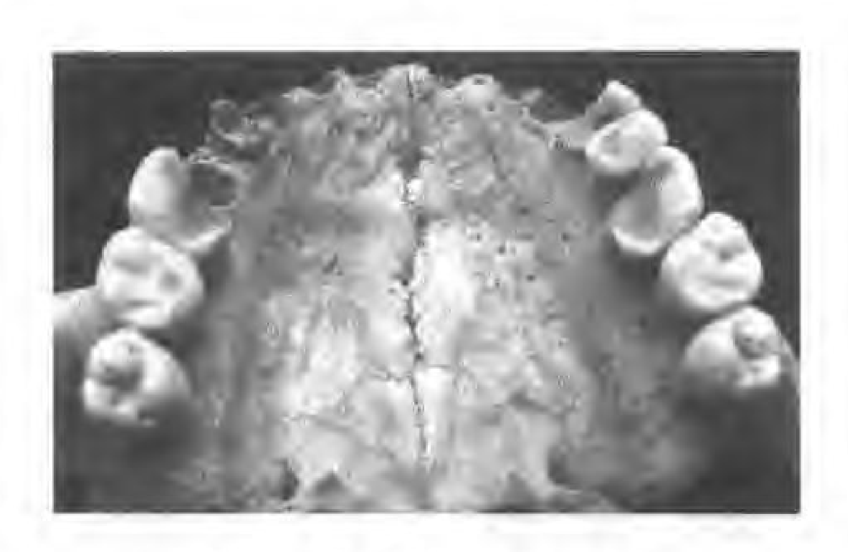


图 13.18　上颌第一臼齿特殊磨耗

采自刘武等:《新疆及内蒙古地区青铜—铁器时代居民牙齿磨耗及健康状况的分析》,《人类学学报》2005 年第 24 卷第 1 期。

第四节　骨骼病理的分析

对古遗址中出土的骨骼病理分析有助于探索某些现代疾病的起源、疾病在历史上的分布范围,及其与食性、生活方式、体质、自然环境的关系。

一、骨骼创伤的分析

人类骨骼中发现的人工畸形,一般被认为与某种风俗和迷信思想有关,如拔牙、扁头、头盖骨锯开等。拔牙习俗在日本的绳纹时代比较普遍,在十四五岁的成年男女中都有发现。我国山东和东南沿海一带也有成年人拔牙的习俗,可能与日本拔牙习俗有文化上的联系。考古工作者既发现古代存在为了某种仪式或美观的需要而拔牙的习俗,也发现了牙齿被治疗的证据。距今 2000 年前,一个埋在 Negev 沙漠中的武士 Nabataean 的一枚牙齿是绿色的。Joe Zias 发现这颗牙齿里面塞进去的一条青铜线已经被氧化,可能当时的牙医欺骗了这位武士,将一条易腐化有毒的青铜线代替金线塞进他的牙齿中。

除此之外,还有其他与外科手术有关的变形。如在我国的青海阳山、大通上孙

家寨、河南安阳、黑龙江平洋墓地的人头骨上发现有颅骨穿孔①，说明早在距今4 000多年前，中国古代已有开颅术。

开颅术，又称"穿颅术"、"环钻术"，是一种不损伤脑膜和脑组织而揭去一部分颅盖骨的外科手术，在欧洲的新石器时代盛行过，18 世纪时引起了学者们的注意。古代实施这种手术通常是在没有麻醉药的情况下进行的，必须非常小心，以避免刺穿脑部。据说这种手术可以减缓脑积水患者的脑压，或治疗头痛、偏头痛，或成为头骨骨折后治疗中的一种方法；还有另一种说法是在头部打一个洞，可释放导致癫痫和精神病的邪恶精灵。青海上孙家寨 M392 头骨上几乎横贯颅中部的手术开创口实属罕见，青海阳山 M70 的头骨穿孔创缘生出骨刺及模糊的"晕圈"状刮削面表明手术的成功。英国目前共发现约 40 个钻洞的头骨，最早的是距今 5 000 年前。

骨骼创伤反映了死者所受的暴力。在墓葬中常常可分析出尸首分离的骨骼上留有的刀斧等砍杀器械的痕迹，这些人无疑是被杀殉的奴隶或刑徒。在一些墓地中，可发现死者骨骼上有箭头嵌入和刀砍的痕迹，说明该地是阵亡的士卒墓地（图 13.19）。此外，一些偶然事故也会引发骨折，依据骨折的形态，可推断致伤暴力的性质。如横断或蝶形骨折系杠杆或成角外力造成，斜形或螺形骨折是因扭转而成，



图 13.19　一个来自比鲁的头盖骨

注：箭头所指为伤口的外缘，洞口边缘显示伤口已经愈合

① 韩康信、陈星灿：《考古发现的中国古代开颅术证据》，《考古》1999 年第 7 期。

跟骨或脊椎骨压缩性骨折则是由垂直冲力造成①。

二、疾病骨骼病理分析

古人经常患病,有一些疾病会以腐蚀、增生等形式改变人类的骨骼,体现为各种骨骼病理现象,如骨髓炎、骨膜炎、活核、梅毒性疾病、麻风病、骨瘤、各种关节病、口腔病,以及某些先天、后天的畸形、缺陷、病变等。

在一些考古遗迹中发现麻风病(Leprosy)和梅毒病(Syphilis)的迹象。现代临床医学认为,这两种病都是通过皮肤和黏膜进入肌肉、神经,最后感染骨骼而引起骨骼病变。麻风病引起的病变最显著的地方在于面部的骨骼,表现为上颌硬腭腐烂穿孔透过鼻腔底或者硬腭骨表出现多孔溶蚀病灶(Porous Lytic Focus),有时鼻前棘、上齿槽突出现萎缩或吸收,上门齿生前脱落。麻风病的病例曾在丹麦的一座古墓(1250—1550)中发现。在我国的山西省朔州市平鲁县汉代墓葬群的M47中的中年妇女颅骨上也表现出类似的外观病理特征,具体为:鼻前棘明显溶蚀萎缩,梨状孔下缘略有溶蚀吸收,上门齿死前已脱落,硬腭中部出现一个大的腐烂洞孔且穿透鼻腔底,鼻中隔和下鼻甲溶蚀腐烂,洞孔周缘的形态不规则,洞孔附近骨表面有腐烂溶蚀和出现很多小孔,腭骨水平板和前接的硬腭明显向下曲折,鼻后孔明显扩大空旷。梅毒病引起的骨骼病变主要体现在颅骨和胫骨部位,最早的梅毒病损伤的骨骼标本是距今约11 500±500年的熊齿兽(Arctodus Sinus),而发现的人类最早梅毒病骨骼是公元前1000—公元前800年的西伯利亚人,在美国所谓的"土墩葬"印第安人、中美洲和秘鲁发现的哥伦布时期以前的墓葬中也找到了梅毒病骨标本。在我国福建省东山县"万福宫"一具可能属于宋代的成年女性颅骨亦显示出梅毒病变的外观特征:额骨眉间区的骨外板已腐烂溶蚀,显示出不规则蛀虫蚕食样的溶蚀腐烂凹痕,额鳞呈现大片的蛀虫蚕食样的溶蚀损伤,骨外板已腐烂,骨松质遭破坏,出现许多小孔,梨状孔下缘及其前方的齿槽突严重溶蚀,鼻前棘和齿槽突溶蚀毁坏,上门齿死前脱落,右侧鼻额缝边缘和右侧上颌附近梨状孔部位亦严

① 潘其风:《古病理学的鉴定及其在考古学研究中的意义》,《科技考古论丛》(第2辑),中国科学技术大学出版社2000年版,第35—36页。

重蚕食，两侧额骨和两侧顶骨骨板也有明显蛀虫损伤痕迹。①

对我国西汉墓轪侯夫人的解剖表明②，死者在生时患有多种疾病，如全身性动脉粥样硬化症、冠状动脉粥样硬化性心脏病和严重的多发性胆石病。由于没有发现女尸皮肤上有久卧病床所常见的褥疮，也没有见到慢性消耗性疾病的症状，据此推知，她很可能是由于胆石病的胆绞痛，诱发心脏病发作，引起严重的心律紊乱而暴亡的。有趣的是，在她保存完好的消化道内还发现130多粒甜瓜子，想来这位贵妇人是在"瓜熟季节"大餐一顿后一小时内死亡的。除了上述病症外，还发现贵妇人有胆囊先天畸形、肺结核钙化病灶、血吸虫病、蛲虫和鞭虫感染、骨质增生、右桡骨和尺骨下端陈旧骨折畸形愈合等。其中"血吸虫病"的发现很重要。血吸虫病是流行在湖沼区域的一种疾病，不下水是不可能感染这种病的。贵妇人生活在城市里，过着饭来张口、衣来伸手的寄生虫生活，怎么会感染上血吸虫病呢？她有可能是出身于湖沼地区，后来虽然身居高位，但当年在湖沼地区感染的血吸虫病仍然潜伏在她的肌体之中，并陪伴着她进入地宫。

1991年在意大利阿尔卑斯发现的冰人事件最为有趣。冰人被发现后立即引起世界范围内的关注，并发生了一些故事。如一位妇女根据新闻照片，坚持声称冰人是她那在山里失踪了的父亲，直到放射性碳素测出其年代距今5 300年，这场闹剧才宣告结束。之后据说有些妇女志愿接受由冰人体内可能被冰冻的精液来受孕。科学研究表明，冰人死于25～40岁，他因身患多种疾病而被恶劣的天气击垮、冻死。他的肺被来自野火的烟熏黑了，动脉的血管已经变硬，有一个脚趾头被冻伤，八根肋骨已经折断，他的颈部、背部和臀部有关节炎。他的指甲条纹表明（当时的指甲生长被减缓）当时他经受着严重的疾病折磨，这大约是他死亡前4～2个月的事。③

古代人骨的研究除以上所述之外，还有许多方面，如用同位素可进行食性分析（其原理前面有介绍）。中国社会科学院考古研究所与美国明尼苏达大学考古实验室合作对殷墟商人食性进行了分析，研究人员从商人肋骨中提取了碳、氮的稳定

① 本段主要参考张振标：《中国古代人类麻风病和梅毒病的骨骼例证》，《人类学学报》1994年第13卷第4期。

② 周世荣、欧光安：《神奇的古墓》，湖南科学技术出版社1981年版，第14－15页。

③ ［美］保罗·巴恩著，覃方明译：《当代学术入门·考古学》，辽宁教育出版社1998年版，第39页。

同位素^{13}C及^{15}N，并用质谱仪测定了它们的具体含量，在分别与小米、小麦等作物中这两种元素含量进行对比后，得出了殷墟商人主食小米的结论。研究人员还对一具殷商时期的新生儿骨头进行了同样的分析，发现其^{15}N值要明显高于其他儿童，专家猜测这与其吃了较多的母乳有关。同时，他们也发现儿童获得的营养一般都比成年人要高，说明他们得到了更多的照顾①。这些人骨来自家族墓地，因而具有代表性。考古工作者还可以对人骨、牙齿进行切片，在显微镜下观察其结构，算出死者的年龄；对古代骨骼进行微量元素分析，可推测食物的来源，恢复古代人的饮食生活。

思考题

1. 运用体质人类学的知识说明中国石器时代人骨的特点。
2. 简述分子生物学技术在考古中的应用。
3. 概括古DNA的分析程序。
4. 举例说明从牙齿形态探索人群的亲缘关系。

① 《考古专家发现殷墟商人主食小米》，《大公报》2000年1月23日。

参考文献

论著和重要报告:

曹兵武.考古学:追寻人类遗失的过去.北京:学苑出版社,2004

崔银秋.新疆古代居民线粒体DNA研究——吐鲁番与罗布泊.长春:吉林大学出版社,2003

郭莉珠等.档案保护技术学教程.北京:中国人民大学出版社,2000

河南省文物考古研究所编著.舞阳贾湖.北京:科学出版社,1999

黄春长.环境变迁.北京:科学出版社,2000

贾文熙.文物养护复制适用技术.西安.陕西旅游出版社,1997

蒋宏耀,张立敏.考古地球物理学.北京:科学出版社,2000

金国樵等.物理考古学.上海:上海科学技术出版社,1989

仇士华主编.中国^{14}C年代学研究.北京:科学出版社,1990

李安模,魏继中.原子吸收及原子荧光光谱分析.北京:科学出版社,2000

李士,秦广雍.现代实验技术在考古中的应用.北京:科学出版社,1991

李树根,董加礼.模糊数学在管理中的应用.长春:吉林工业大学出版社,1986

李余增.热分析.北京:清华大学出版社,1987年

陆守一等.地理信息系统实用教程.北京:中国林业出版社,2000

马承源主编.文物保护科学论文集.上海:上海科学技术出版社,1996

马清林等.中国文物分析鉴别与科学保护.北京:科学出版社,2001

沙因等主编.考古文物与现代科技.北京:人民出版社,2001

沈同,王镜岩主编.生物化学.北京:高等教育出版社,1999

宋宝泉,邵锡惠.遥感考古学.郑州:中州古籍出版社,2000

宋迪生等.文物与化学.成都:四川教育出版社,1991
武汉地质学院金属物探教研室.电法勘探教程.北京:地质出版社,1980
伍宗华等.汞的勘查地球化学.北京:地质出版社,1994
王昌燧编.科技考古论丛,第一辑.合肥:中国科学技术大学出版社,1991
王昌燧,左键编.科技考古论丛,第二辑.合肥:中国科学技术大学出版社,2000
王蕙贞.文物保护材料学.西安:西北大学出版社,1995
文焕然,文榕生.中国历史时期冬半年气候冷暖变迁.北京:科学出版社,1996
王维达主编.中国热释光与电子自旋共振测定年代研究.上海:中国计量出版社,1997
王永吉,吕厚远.植物硅酸体研究及应用.北京:海洋出版社,1993
吴汝康.古人类学.北京:文物出版社,1989
吴汝康,吴新智等.中国古人类遗址.上海:上海科学教育出版社,1999
西安半坡博物馆等.姜寨.北京:文物出版社,1988
夏正楷.第四纪环境学.北京:北京大学出版社,2000
谢宇平等.第四纪地质学及地貌学.北京:地质出版社,1994
徐绍铨等.GPS测量原理及应用.武汉:武汉测绘科技大学出版社,1998
徐毓明.艺术品和图书档案保养法.北京:科学普及出版社,1985
严文明.走向21世纪的考古学.西安:三秦出版社,1997
阎隆飞,张玉麟主编.分子生物学.北京:中国农业大学出版社,1997
杨伦标,高英仪.模糊数学原理及应用.广州:华南理工大学出版社,1995
杨群主编.分子古生物学原理与方法.北京:科学出版社,2003
于光远主编.信息新视角——悄然崛起的地球空间信息学.武汉:湖北教育出版社,2000
俞伟超主编.考古类型学的理论与实践.北京:文物出版社,1989
于秀林,任雪松编.多元统计分析.北京:中国统计出版社,1999
尤玉柱.史前考古埋藏学概论.北京:文物出版社,1989
知原.面向大地的求索——20世纪的中国考古学.北京:文物出版社,1999
赵振茂.青铜器的修复技术.北京:紫禁城出版社,1988
朱俊英.考古勘探.北京:科学出版社,1996
周宝中.文物保护科技文集.台北:台北"国立历史博物馆"出版,2000

周大鸣,乔晓勤.现代人类学.重庆:重庆出版社,1990
周昆叔,巩启明.环境考古研究.第一辑.北京:科学出版社,1991
周昆叔,宋豫秦.环境考古研究.第二辑.北京:科学出版社,2000
周昆叔.花粉分析与环境考古.北京:学苑出版社,2002
周仁等.中国古代陶瓷研究论文集.北京:轻工业出版社,1983
张宝峰.穆斯堡尔谱学.天津:天津大学出版社,1991
张承志.文物保藏学原理.北京:北京科学技术出版社, 1999
张玉静主编.分子遗传学.北京:科学出版社,2002
张忠培.中国考古学.实践·理论·方法.郑州:中州古籍出版社,1994
中国纺织品鉴定保护中心编.纺织品鉴定保护概论.北京:文物出版社, 2002
中国历史博物馆遥感与航空摄影考古中心,内蒙古自治区文物考古研究所.内蒙古东南部航空摄影考古报告.北京:科学出版社,2002
中国历史博物馆考古部编.当代国外考古学理论与方法.西安:三秦出版社,1991
中国文物研究所编.文物科技研究第一辑.北京:科学出版社,2003
中国社会科学院考古研究所.考古工作手册.北京:文物出版社,1982
中国社会科学院考古研究所.新中国的考古发现和研究.北京:文物出版社,1984
中国社会科学院考古研究所等.安阳殷墟头骨研究.北京:文物出版社,1985
中国社会科学院考古研究所编.考古学的历史·理论·实践.郑州:中州古籍出版社,1996
保罗·巴恩著.考古学.覃方明译.沈阳:辽宁教育出版社,1998
保罗·鲍克斯著.地理信息系统与文化资源管理.胡明星,董卫译.南京:东南大学出版社,1999
多洛雷斯·派潘诺著.植硅石分析——在考古学和地质学中的应用.姜钦华等译.北京:北京大学出版社,1994
格林·丹尼尔著.考古学一百五十年.黄其煦译.北京:文物出版社,1987
科林·伦福儒,保罗·巴恩著.考古学:理论、方法与实践.中国社会科学院考古研究所译.北京:文物出版社,2004
理查德·利基著.人类的起源.吴汝康等译.上海:上海科学技术出版社,1995
狄拉克著.量子力学原理.陈咸亨译.北京:科学出版社,1965
基思·马克尔瑞著.海洋考古学.戴开元等译.北京:海洋出版社,1992

唐纳德·L.哈迪斯蒂著.生态人类学. 郭凡,邹和译.北京:文物出版社,2002
日本第三次大学与科学公开学术研讨会组织委员会编,陕西省考古研究所韩钊等.现代自然科学技术在考古学中的应用.西安:西北大学出版社,1992
西拉姆著.神祇,坟墓,学者. 刘逦元译.北京:三联书店,1991
小江庆雄著.水下考古学入门. 王军译.北京:文物出版社,1996
L. L. 卡瓦利—斯福扎,F. 卡瓦利—斯福扎著.人类的大迁徙——我们是来自非洲吗? 乐俊河译.北京:科学出版社,1998
Binford L. For Theory Building in Archaeology. Orlando, Florida: Academic Press, 1977
Binford L R. Bones. Ancient Men and Modern Myths. New York: Academic Press, 1981
Binford L R. Archaeological Perspectives. In:Binford S R & Binford L R. New perspectives in archaeology. Chicago: Aldine. 1968
Birdsell J. Human Evolution. 2nd. Chicago :Rand McNally, 1975
Boughey A S. Man and Environment. 2nd. New York :Macmillan, 1975
Clark A J. Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology. London: B. T. Batsford Ltd. ,1990
Childe V G. Social Evolution. London: C. A. Watts, 1951
Darwin C. On the Origin of the Species by Means of Natural Selection of the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life. London: Murray, 1859
Dimbleby G W. Plants and Archaeology. New York: Humanities Press, 1967
Doran F E, Hodson F R. Mathematics and Computers in Archaeology. Cambridge: Harvard University Press, 1975
Wilson D R. Air Photo Interpretation for Archaeologists. St. New York: Martin's Press, Inc. , 1982
Gordon R W. Prehistoric Settlement Patterns in the Viru Valley . Washington D. C: Peru, Washington D C. Smithesonian Institution, 1953
Piperno D R. Phytolith Analysis: an archaeological and geological perspective. Florida: Academic Press, USA. 1988
Hodder I. Symbolic and Structural Archaeology. Cambridge: Cambridgè University

Press, 1982

Harris M L. Culture. Man and Nature. New York: Thomas Y. Crowell, 1971

Li Chi. Anyang . Washington :University of Washington Press, 1977

Orlove B S. Mathematics is Archaeology. Cambridge: Cambridge University Press, 1983

Peter L D. Field Archaeology: An Introduction. London: University College London Press, 1999

Renfrew C. The Emergence of Civilization. London: Methuen, 1975

Renfrew C. Approaches to Social Archaeology. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1984

Ryder M L. Animal Bones in Archaeology. Oxford: Oxford University Press, 1968

Sanders W, Price B. Mesoamerica, the Evolution of a Civilization. New York :Random House, 1968

Schiffer M B. Behavioral Archaeology. New York: Academic Press, 1976

Schiffer M B. Formation Processes of the Archaeological Record. Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico Press, 1987

Shanks M, Tilley C. Social Theory and Archaeology. Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico Press, 1987

Taylor R E. Archaeometry: The Meaning of the Term. In: Olin J S. Future Directions in Archaeometry. USA :Smithsonian Institution, 1982, 25 -26

Trigger B G. A history of archaeological thought. Cambridge: Cambridge University Press, 1994

Willey G R, Phillips. Method and Theory in American Archaeology. Chicago :Chicago University of Chicago Press, 1958

论文:

蔡连珍.^{14}C年代测定——史前考古断代方法之一.考古与文物,1980(2)

蔡莲珍,仇士华.碳十三测定和古代食谱研究.考古,1984(10)

曹兵武.GIS与考古学.考古与文物,1997(4)

陈德珍.中国新石器时代居民体质及其继承关系.人类学学报,1986(2)

陈建立.数学分析方法在考古学中的应用.中原文物,2000(1)
陈铁梅.应用于考古学中的年代测定方法综评.考古与文物,1980(3)
陈铁梅.多元分析方法应用于考古学中相对年代研究——兼论渭南史家墓地三种相对年代分期方案的比较.史前研究,1983(3)
陈铁梅.我国旧石器考古年代学的进展与评述.考古学报,1988(3)
陈铁梅,何弩.计算机技术对河南省二里头二期至人民公园期陶豆分类的尝试.见:考古学文化论集(二).北京:文物出版社,1989
陈铁梅.彭头山等遗址陶片和我国最早水稻遗存的加速器质谱^{14}C测年.文物,1994(3)
陈铁梅.我国科技考古发展的回顾.中国文物报,1999-11-17(3)
陈铁梅.九十年代科技考古的发展.中国考古学年鉴,2000
陈星灿等.二十一世纪考古学的展望.东南文化,2000(1)
程介克.人的基因组及DNA序列分析.分析科学学报,1994
崔晓林.热释光测定年代.中国文物报 1994-4-10(2)
丁颖.中国栽培稻种的起源及其演变.见:稻作科学论文选集.北京:农业出版社,1959
高立兵等.高密度电阻率法在商丘东周城址考古勘探中的应用.考古,2004(7)
郭之虞,马宏骥.如何看待与使用系列样品^{14}C年代校正方法.中国文物报,2002-6-21(5)
韩康信,潘其风.古代中国人种成分研究.考古学报,1984(2)
韩康信等.中国和日本古代仪式拔牙的比较研究.考古学报,1998(3)
韩康信,陈星灿.考古发现的中国古代开颅术证.考古,1999(7)
贾伟明.数学方法在考古学研究中应用的探讨.见:考古学文化论集(一).北京:文物出版社,1987
姜钦华.花粉分析与植硅石分析的结合在考古学中的应用.考古,1994(4)
郎惠云等.从成分分析探讨唐三彩的传播与流通.考古,1998(7)
李科威.考古类型学的计算机实现,问题和前景.考古与文物,1990(5)
李科威.考古类型学的进化观与文化动力学问题.东南文化,1992(2)
李季.编译与解读——迈向新世纪的中国史前考古学.东南文化,2000(1)
梁启超.中国考古学之过去及将来.重华月刊,1931(1)

刘建国.遥感考古的原理与方法.考古,1994(4)
吕厚远等.水稻扇型硅酸体的鉴定及在考古学中的应用.考古,1996(4)
孟庆福等.中国新古器时代居民体质特征的多元统计分析.社会科学战线,1992(4)
钱三强.迎接交叉科学的新时代.光明日报,1985-9-17
潘其风,韩康信.体质人类学.中国大百科全书·考古学.北京:中国大百科全书出版社,1986
潘其风.中国古代居民种系分析初探.考古学论文集(一).北京:文物出版社,1987
潘其风.内蒙古和东北地区商周时期至汉代居民的人种类型及其相互关系.中国考古学论丛.北京:科学出版社,1995
潘其风.古病理学的鉴定及其在考古学研究中的意义.见:科技考古论丛,第2辑.合肥:中国科学技术大学出版社,2000
裴安平,李科威.雨台山楚墓CASA年代序列分析与相关问题探讨.考古,1991(5)
祁国琴,袁靖.欧美动物考古学简史.华夏考古,1997(3)
齐乌云等.从胶东半岛贝丘遗址的孢粉分析看当时的人地关系.考古,2002(7)
仇士华,蔡莲珍.陶器的热释光测定年代介绍.考古,1978(5)
仇士华.碳十四断代的加速器质谱计数方法.考古,1987(6)
仇士华,蔡莲珍.科技方法在考古学上的应用.中国考古学年鉴,1990
宋长青,孙湘君.中国第四纪孢粉学研究进展.地球科学进展,1999(4)
宋豫秦.生态过渡带之人地关系刍议.见:环境考古研究,第2辑.北京:科学出版社,2000
王全玉.自然科学与社会科学嫁接的产物——科技考古学.世界科技研究与发展20(3)
童恩正.略述东南亚及中国南部农业起源的若干问题.农业考古,1984(2)
王才林等.植物蛋白石分析法及其在考古学上的应用.东南文化,1997(3)
王才林等.江苏昆山市少卿山遗址的植物蛋白石分析.考古,2000(4)
王昌燧.国际科技考古研究的现状与动向.环境遥感考古专辑.华东师范大学学报,1998(4)
王昌燧.文物产地研究发展简史.科技考古论丛,第一辑.合肥:中国科学技术大学出版社,1991

王昌燧.文物产地研究溯源.中国文物报,1999-12-29
王树芝.树木年轮分析在考古学研究中的应用.中国文物报,2001-5-16(7)
王维达,周智新.用热释光元件测定陶器的热释光量——热释光断代技术的新进展.考古,1983(7)
王迅.模糊数学在考古学研究中的应用.考古与文物,1989(1)
王增林.扫描电子显微镜在考古中的应用简介.考古,1994(11)
吴新智.论中国古人类的连续发展.见:中国原始文化论集——纪念尹达八十诞辰.北京:文物出版社,1989
夏鼐.碳-^{14}C测定年代和中国史前考古学.考古,1977(4)
夏鼐.五四运动和中国近代考古学的兴起.考古,1979(3)
夏鼐.中国考古学和中国科技史.考古,1984(5)
夏鼐,王仲殊.考古学.见:中国大百科全书·考古学.北京:中国大百科全书出版社,1986
徐毓明.文物科技学概论.见:文物科技研究,第一辑.北京:科学出版社,2004
许志勇编译.航空摄影与考古的基本方法.北方文物,2001(1)
谢仲礼.生物学与考古学的最新结合——考古寄生物学简介.考古,1993(11)
阎桂林.考古磁学——磁学在考古中的应用.考古,1997(1)
严文明.中国史前稻作农业遗存的新发现.江汉考古,1990(3)
严文明.科学技术与考古学.见:科技考古论丛,第三辑.合肥:中国科学技术大学出版社,2003
闫永利等.高密度电阻率法在考古勘探中的应用.物探与化探,1998,22(6)
袁靖.关于动物考古学研究的几个问题.考古,1994(10)
袁靖等.中国科技考古五十年.考古,1999(9)
原思训.加速器质谱法测定兴隆纹饰鹿角与峙峪遗址等样品的^{14}C年代.人类学学报,1993,12(1)
俞伟超,张忠培.探索与追求.文物,1984(1)
俞伟超,张爱冰.考古学新理解论纲.中国社会科学,1992(6)
俞伟超.人文科学与自然科学的结合——在"现代科技考古研讨会"上的发言.文物,1999(5)
尤玉柱.动物考古的若干方法.考古与文物,1986(4)

张光直.当前美国和英国考古概况.史前研究,1984(1)
张光直.考古学和中国历史学.中国考古学论文集,三联书店,1999
张君.古代人骨研究的新方法.中国文物报,1996-5-19(3)
张雪莲.夏商周断代工程中^{14}C测年是怎样参与解决历史时期年代问题的.中国文物报,2001-12-28
张雪莲,仇士华,蔡莲珍.琉璃河西周墓葬的高精度年代测定.考古学报,2003(1)
张雪莲等.古人类食物结构研究.考古,2003(2)
张寅生.水下考古与水下考古探测技术.东南文化,1996(4)
张寅生.磁法在田野考古勘探中的应用研究.考古,2002(7)
张振标等.中国新石器时代居民体质类型初探.古脊椎动物与古人类,1982(1)
赵力华.脂肪酸分析法与树木年轮年代测定法.文物,1999(3)
赵志军.植物考古学的田野工作方法—浮选法.考古,2004(3)
周本雄.考古动物学.见:中国大百科全书·考古学.北京:中国大百科全书出版社,1986
周昆叔.西安半坡新石器时代遗址的孢粉分析.考古,1963(9)
周昆叔等.花粉分析方法及其在考古学中的应用.考古,1975(1)
周昆叔等.塑造现今地质地理环境的划时代事件——2500年来气候变凉干及其影响.见:环境考古研究,第一辑.北京:科学出版社,1991
竺可桢.中国近五千年来气候变迁的初步研究.考古学报,1972(1)
朱泓.关于殷人与周人的体质类型比较.华夏考古,1989(1)
朱泓.中国南方新石器时代居民体质类型的聚类分析.中国考古学会第七次年会论文集.北京:文物出版社,1989
朱泓.黄河流域新石器时代居民体质特征的聚类分析.北方文物,1990(4)
朱泓,孟庆福.中国北方青铜时代居民体质特征的多元统计分析.博物馆研究,1993(3)
朱泓.中国东北地区的古代种族.文物季刊,1998(1)
朱泓.中国古代居民种族人类学研究的回顾与前瞻.见:中国考古学跨世纪的回顾与前瞻——1999年西夏国际学术研讨会文集.北京:科学出版社,2000
朱来东.遥感技术与农业考古.农业考古,1986(2)
朱乃诚.概率分析方法在考古学中的初步应用——以陕西渭南史家墓地的墓葬为

分析对象.史前研究,1984(1)

中国河南省文物考古研究所等.河南颍河上游考古调查中运用GPS与GIS的初步报告.华夏考古,1998(1)

中国社会科学院考古研究所考古技术实验研究中心.考古研究所科技考古二十年.考古,1997(8)

钟世航.用物探方法解决文物保护和考古中的某些难题.地球物理学报,1991,34(5)

布莱恩·费根.用鱼骨和鱼鳞判断遗址曾被占用的季节.晓文译.北方文物,1990(4)

弗·温多夫.加速器质谱技术在田野考古应用的进展.郭庆春译.中原文物,1995(4)

科林·伦福儒.对考古学解释的反思.见:中国考古学.实践,理论,方法.郑州:中州古籍出版社,1994

路易斯·宾福德.作为人类学的考古学.见:国外考古学理论与方法.西安:三秦出版社,1991

福尔德·平格尔,宋宝泉.航空摄影考古在中国应用之探讨.见:"迎接二十一世纪的中国考古学"国际学术讨论会.北京:科学出版社,1998

皮特尔·白特甘.新石器时代湖边居址和自然资源的管理——一种多学科交叉的环境研究方法.赵冰译.见:考古学研究(四).北京:科学出版社,2000

R.L霍兹.DNA资料重绘人类演化图.江汉考古,1997(4)

西本丰弘著.动物考古学的方法.陈杰译.北方文物,2000(1)

新美伦子著.日本的动物遗存研究状况.陈文译.华夏考古,1997(1)

Pollard A M,Hatcher H. The Chemical analysis of oriental ceramic body compositions: Part I: wares from North China. Archaeometry, 1994, 36 (1)

Bass G F,Katzev M L. New tools for underwater archaeology. Archaeology, 1968(21)

Cann R L,Stoneking M and Wilson A C. Mitochondrial DNA human evolution. Nature, 1987,325:31—36

Cann R L. DNA and human origins. Ann Rev Anthropol, 1988, 17:127 – 143

Piperno D R. Phytolith taphonomy and ditribution in archaeological sediments from Panama. Journal of Archaeological Science, 1985(12)

Pearson G W. Precise calendrical dating of known growth - period sample using a "Curve Fitting" technique. Radiocarbon, 1986,28(2A)

Hagelberg E. Ancient and modern mitochondrial DNA sequences and the colonization of the Pacific. Electrophoresis, 1997,18

Libby W F et - al. Age determination by radiocarbon contents: world wide assay of nature radiocaron. Science, 1949,109

Kurmann M H. An opal phytolith and palynomorph study of extant and fossil soils in kansas (USA). Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 1985,49: 217 - 235

Michael B Schiffer. Advances in archaeological method and theory. London: Academic Press, Inc. Ltd,1984(7):300 - 301

Ovchinnikov I V, Gotherstrom A, Romanova G P, et al. Molecular analysis of neanderthal DNA from the northern Caucasus. Nature, 2000,404:490 - 493

Palmer R. A computer method of transcribing information graphically from oblique aerial photographs to maps. Journal Archaeological Science 4, 1977, 283 - 290

Iacumin P. Stable carbon and nitrogen isotopes as dietary indicators of ancient nubian populations(Northern Sudan). Journal of Archaeological Science, 1998(25)

Stone A C, Stonking M. mtDNA analysis of a prehistoric Oneota population: Implications for the peopling of the new world. Am J Hum Genet, 1998: 62

Stove G C, Addyman P V. Grounding - probing impulse radar: an experiment in archaeological remote sensing in York. Antiquity, 1989,63, 337 - 342

Synnott P. Geographical information systems - an archaeological application. In: Discovery Programme Reports No. 4. Dublin: The Discovery Programme. 1996

后　记

这本教材终于和读者见面了。回想其成书过程，算来竟有了十几个年头。那是20世纪90年代初，当时我正酝酿并实施编写一套关于中国考古学研究的丛书，定名为“中国考古学序列”，邀请多位学者撰稿，计划编写二十多本，《科技考古学》即为其中之一。90年代中期，一批书稿相继完稿，《科技考古学》亦于那时写成。但由于出版社方面出版计划的变更而未能及时出版，这些书稿就搁置下来。

《科技考古学》初稿由我与郭妍利合作完成。当时郭妍利在西安交通大学做教学工作，我们分别在西安交通大学和西北大学开设“科技考古学概论”课程和与此相关的专题课，以《科技考古学》书稿作讲义有数年之久。与我同在西北大学的刘成老师，也较早为文物保护专业及考古专业学生开设了“科技考古”课程，有多年的授课积累。2001年，教育部推出“十五规划教材”实施计划，自己当时想到不少高校都开设有这方面课程，但却未看到有公开出版的专门教材，这是与人才的培养和学科发展不适应的，而且学生们也希望有一本可阅读学习的书本。鉴于此，我们将这一实际上作为教材使用多年的书稿以《科技考古学概论》为名进行了申报，得到批准（被教育部批准列为“十五规划教材”之一）。

为了保证书稿内容的广泛性和教学实用性及质量，我们邀请了北京大学的李伯谦教授、中国科技大学的王昌燧教授作为该教材的审稿人。两位先生对此给予相当的重视，王昌燧先生还寄来由他编写的研究生用教材《科技考古学概论》(上册，2001年打印本，内部使用)，使我们知道王先生也已有了这方面的考虑。后来在教材编写的工作中，还吸收了由中国科技大学博士毕业去郑州大学任教的朱君孝参加了该项工作。西北大学的青年教师凌雪也承担了部分编写任务。因此可以说，这本教材最后的完成，是一个集体协作和校际协作的成果。

在教材将要出版的时候，我却感到很不安。尽管十几年来书稿经过无数次的修改，然而仍觉得不满意。飞速发展的现代科学技术使科技考古的新手段与新方法层出不穷，常有目不暇接之感；而如何架构科技考古学的体系并将宠大繁复的知识内容恰当囊括于其中，更是不容易做的。又因为，科技考古学原本着实不属本人的研究重点，只因为这本书才使自己对这方面有了较多接触，在不断遇到新问题时，每每靠的是一种责任感来鞭策自己克服困难。回过头来想，我国考古界有那么多学者在做科技考古的研究，他们中任何一位专家做此项工作都比我要合适，只好赖“抛砖引玉”而聊以自慰。

还让我感到遗憾的是，在教材编写大纲中，设计有《田野发掘中的科技方法》一章，但最终未能完成，主要是由于我们在这方面的积累薄弱，待今后有机会弥补吧。

依科技考古学的现状而言，我更愿意把这本教材看作是一棵幼苗，而且它还很弱小。我们企盼考古界的同仁关心这棵小幼苗，企盼读者们的宝贵意见，使它能在考古学这块学术沃土上，在大家的热心培育下长大。因为，高校的人才培养需要这方面的教材，考古界需要这方面的研究参考书，我们愿为此继续付出应有的努力。

本书在定稿前，陈铁梅先生、张雪莲研究员和杨晓燕博士等提出了宝贵的意见，王虹高级工程师参与了下篇第十二章的修改定稿工作。李伯谦教授和王昌燧教授在百忙中对书稿进行了审阅，王昌燧教授并欣然作序。

著名学者和教育家、西北大学名誉校长张岂之先生，一直关心和支持该教材的编写和出版。西北大学文博学院的领导，对本教材的完成给予了重视和多方面的支持。孙丽娟、周剑虹、王志友、黄薇、赵戈等，也对此工作给予了不少帮助。高教出版社王方宪编审、于建航女士积极组织和推动书稿的进展；责任编辑鲍莉炜为本

书的编辑出版付出了大量心血。对以上各方面的关心和帮助，在此表达我们诚挚的感谢。

赵丛苍

2005年10月

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝科技考古学概论
作者＝
页数＝４４８
ＳＳ号＝０
出版日期＝

封面
书名
版权
前言
目录
正文